HISTORIA DE LA FÍSICA
El teorema de Noether cumple 100 años

ECOLOGÍA
Impacto ecológico de la pesca deportiva

NEUROCIENCIA
El virus de la rabia en el cerebro

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2018 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American



INFORME ESPECIAL

LA CIENCIA, A EXAMEN

Una mirada autocrítica sobre los puntos débiles de la ciencia actual

9 770210 136004 00507
6,90 EUROS

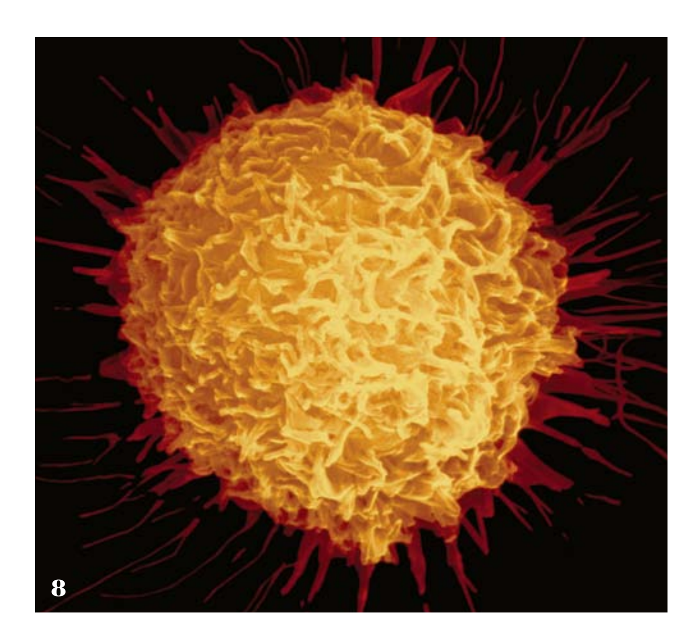
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DICIEMBRE 2018 N.º 507 LA CIENCIA, A EXAMEN | 100 AÑOS DEL TEOREMA DE NOETHER | LA RABIA EN EL CEREBRO

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Diciembre 2018, Número 507

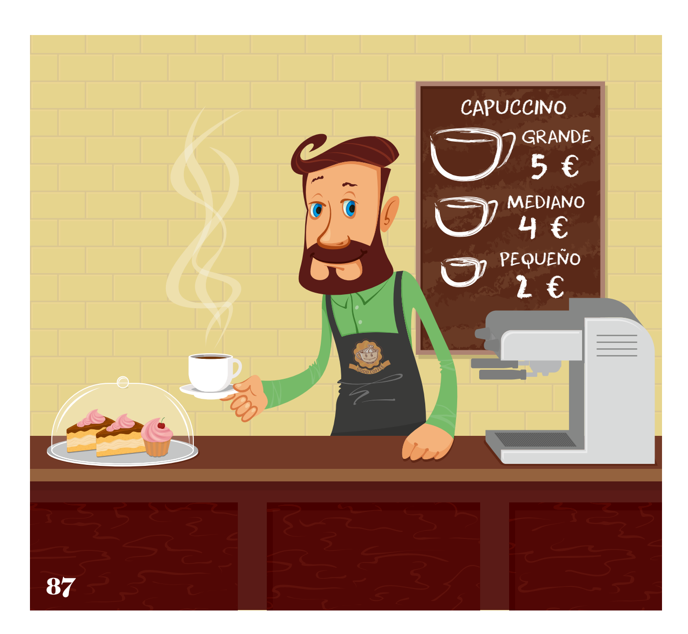
62

CHRIS BJORNBERG, SCIENCE SOURCE

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES



EN PORTADA

Para mejorar su calidad y hacer frente a los movimientos anticientíficos y negacionistas que se extienden por el mundo, la ciencia debe dirigir una mirada autocrítica a sus propias flaquezas. Varias estrategias pueden fortalecer la labor científica, entre ellas mejorar la financiación, favorecer los proyectos interdisciplinarios y obtener unos resultados que sean reproducibles. Ilustración: Talaj/antoniokhr/iStock; composición: *Investigación y Ciencia*.



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio y Octubre de 2018

EL ENIGMA DE LA ANESTESIA

En «El impulso nervioso, reimaginado» [Investigación y Ciencia, junio de 2018], Douglas Fox explica las ideas de Thomas Heimburg sobre el mecanismo por el cual la anestesia afecta a las neuronas. Heimburg sostiene que esta podría funcionar al penetrar en las membranas celulares, formadas por ácidos grasos, y alterar así sus propiedades físicas. Este mecanismo sería compatible con el trabajo de Ernest Overton, quien en 1901 halló que la potencia anestésica de un fármaco aumentaba con su liposolubilidad.

Sin embargo, se ha demostrado que ese vínculo solo se mantiene hasta cierto tamaño de la molécula («Do general anaesthetics act by competitive binding to specific receptors?», N. P. Franks y W. R. Lieb, *Nature*, vol. 310, 1984; «Polyhalogenated and perfluorinated compounds that disobey the Meyer-Overton hypothesis», D. D. Koblin et al., *Anesthesia and Analgesia*, vol. 79, 1994). Para ciertos compuestos, como los alcoholes, su lipofilicidad crece con la cantidad de carbonos. Pero su potencia aumenta solo hasta cierto punto, más allá del cual el efecto anestésico se pierde. Sin embargo, estos compuestos aún pueden disolverse en los lípidos de las membranas celulares, por lo que el mecanismo propuesto por Heimburg debería mantenerse con independencia del tamaño de la molécula.

Que el efecto anestésico desaparezca al alcanzar la molécula cierto tamaño sugiere que el mecanismo subyacente no es la lipofilicidad del fármaco, sino que la molécula debe encajar en los «bolsillos» hidrófobos de los canales iónicos. Superado ese tamaño, la molécula sería demasiado grande para caber en ellos, con lo que el efecto anestésico se desvanecería.

José Luis Sandagorta Chacón
Bilbao

Responde Fox: *Los anestésicos que violan la regla de Meyer-Overton plantean un punto interesante y proporcionan una excelente oportunidad para poner a prueba la teoría de Heimburg y Jackson. La solubilidad no es más que uno de los aspectos que determinan la manera en que un anestésico interactúa con las membranas lipídicas, y puede reflejar o no la forma en que este afecta a las transiciones de fase de las membranas. Sería interesante que Heimburg y Jackson repitiesen algunos de sus experimentos, comparando aquellos anestésicos que siguen la regla de Meyer-Overton con aquellos que la violan.*

ABORTO Y CONTRACEPCIÓN

En el comentario del libro *Fear, Wonder and Science*, firmado por Luis Alonso [Investigación y Ciencia, octubre de 2018], se dice lo siguiente: «Se afirma, por ejemplo, que el espermatozoide más rápido es el que alcanza a fecundar el óvulo y que lo hace al perforarlo, o que la píldora del día después causa el aborto. Ninguno de esos enunciados es correcto. No pocos los toman como verdades científicas y creen que, como tales, han de admitirse».

Cuando se niega que los contraceptivos poscoitales puedan actuar por un mecanismo abortivo, ello se fundamenta en dos razones diferentes.

En primer lugar, negando la capacidad de estos fármacos de interferir en el embrión preimplantado, por atribuirles exclusivamente un mecanismo anovulatorio. Aunque es este un criterio muy extendido, hay abundante bibliografía que afirma lo contrario. Nosotros mismos hemos realizado una revisión sistemática y hemos concluido que, en gran parte de los casos, el mecanismo responsable es antiimplantatorio («Does levonorgestrel emergency contraceptive have a post-fertilization effect? A review of its mechanism of action», R. Peck et al., *The Linacre Quarterly*, vol. 83, 2016; «Ulipristal acetate: An emergency contraceptive?», J. Aznar y J. Tudela, *Medicina e Morale*, 2011).

En segundo lugar, basándose en una definición del embarazo como restringido al período posimplantatorio, excluyendo por tanto del término *aborto* toda acción que termine con la vida del embrión preimplantado, como ocurre en muchas ocasiones al usar la contracepción.

Terminar con la vida de un embrión, preimplantado o no, no debería ofrecer valoraciones éticas diferentes. La capacidad bien contrastada de los contraceptivos poscoitales de interferir en el proceso implantatorio y de terminar con la vida del embrión temprano les confiere una consideración ética negativa, similar a la del aborto posimplantatorio.

Justo Aznar
Julio Tudela
Instituto de Ciencias de la Vida
Universidad Católica de Valencia

Responde Alonso: *La carta plantea muy bien el espinoso tema del momento de la individuación, exigido para poder hablar con propiedad de aborto. Antes de la implantación, el estatus del embrión no está determinado. La clasificación jurídica y ética del blastocisto (conjunto inicial de células previo a la implantación) hasta la gastrulación (formación de las primeras capas germinales a partir de las cuales se originarán los tejidos) es un tema filosófico más que científico, aunque deba basarse en la biología del desarrollo. En el laboratorio, ese problema se expresa mediante la norma de los catorce días, intervalo en que se permite en algunos países experimentar con embriones humanos. Ese tope acaba de ser cuestionado, pues se ha observado que, in vitro, el embrión puede desarrollarse al menos una semana más de lo que se pensaba cuando se estableció la norma.*

La reseña no entra en esas valoraciones, sino que se ciñe al mecanismo físico de la fecundación (perforación de la membrana del óvulo) y al mecanismo bioquímico, disputado, de la sustancia química empleada para impedir la fijación del embrión en la pared uterina.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



La investigación sobre el whisky ofrece nuevas técnicas para detectar alimentos fraudulentos.

GETTY IMAGES

ALIMENTACIÓN

Whisky fraudulento

El estudio de este licor está impulsando nuevas técnicas para detectar estafas alimentarias

El año pasado, la subastadora de whisky Isabel Graham-Yooll estaba examinando la colección de un vendedor en Londres cuando se percató de que algunos licores mostraban un color ligeramente distinto del habitual y de que varias botellas parecían demasiado llenas. Llamó a la policía, que arrestó al vendedor por fraude. Si el caso va a los tribunales, los fiscales quizá dispongan de algo más que de los conocimientos sobre whisky de Graham-Yooll: nuevas técnicas de laboratorio.

El estudio científico del whisky se ha visto de repente a la vanguardia del floreciente campo del de la detección de fraudes alimentarios. Este licor constituye un buen banco de pruebas debido a su complejidad. Sus ingredientes principales, el agua y la cebada u otros cereales, y su método de producción dejan huellas químicas y biológicas únicas. Y el tiempo que pasa en barriles de madera le confiere su color dorado y su aroma característico. «Si [una nueva] técnica funciona para el whisky, podemos estar seguros de que servirá para otros licores», asegura Shona Harrison, directora de los servicios de análisis del Instituto de Investigación sobre el Whisky Escocés (SWRI) de Edimburgo, cuyo trabajo está financiado por varias compañías de licores. Harrison y otros investigadores están luchando contra el fraude alimentario en múltiples frentes, desde la supervisión de los datos de comercio mundial hasta la adaptación de instrumentos de laboratorio.

Las falsificaciones a menudo responden a picos repentinos en la demanda de un producto concreto. El

whisky escocés falso, por ejemplo, es más común en aquellos lugares donde los proveedores legítimos no logran seguir el ritmo de la demanda. Y en el último par de años, una miel de Nueva Zelanda llamada *mānuka* experimentó un repunte de popularidad que inundó el mercado con una versión fraudulenta.

Etiquetar un whisky, una miel u otros productos de baja calidad como si fueran primeras marcas perjudica sobre todo a los propietarios de esas firmas. Pero, además, algunas estafas han causado enfermos e incluso muertos. Así ocurrió el año pasado en la India, cuando seis personas fallecieron y otras treinta enfermaron debido a una intoxicación por metanol tras beber licor comprado en el mercado negro. El fraude alimentario es lucrativo: los delincuentes pueden embolsarse decenas de miles de euros por cada remesa de productos falsificados. Y, si los atrapan, las sentencias son mucho menos severas que las relacionadas con el tráfico de drogas.

Detectar lotes fraudulentos cuando el producto ya está a la venta no es lo ideal, ya que entonces la respuesta puede llegar demasiado tarde. Como consecuencia, la experta en tecnología de los alimentos Katharina Verhaelen, de la Oficina de Salud y Seguridad Alimentaria de Baviera, y sus colaboradores han desarrollado un programa informático que supervisa mensualmente las importaciones en Alemania y señala cambios sospechosos en las cantidades o el precio de los productos. Este sistema ayudó a identificar unas avellanas adulteradas asociadas a una subida de precios sin precedentes, según anunció el equipo de Verhaelen en el número de diciembre de la revista *Food Control*.



ALAMBIQUES de cobre para whisky.

Los investigadores también usan las noticias publicadas en los medios de comunicación para rastrear alimentos falsificados. En un estudio publicado en noviembre, el experto en cadenas de abastecimiento Yamine Bouzembrak, de la neerlandesa Universidad de Wageningen, y sus colaboradores adaptaron el programa de alertas de salud pública MedISys, que examina las noticias en línea y registra posibles casos de contaminación alimentaria, para detectar fraudes. A finales de septiembre ya habían identificado y confirmado 5174 incidentes de fraude alimentario, asegura Bouzembrak, y tenían prevista una reunión con autoridades europeas en la conferencia FoodIntegrity, celebrada en noviembre en Nantes. Planeaban discutir la incorporación de una herramienta mejorada, MedISys-FF, en los sistemas de alerta temprana para la contaminación de alimentos.

A medida que se han ido desarrollando métodos para controlar el fraude alimentario en el mercado, también lo ha hecho la tecnología comercial para detectarlo a nivel molecular. En una conferencia celebrada en 2017, Harrison se topó con un espectrómetro portátil: un dispositivo que separa la luz que pasa a través de un líquido en sus longitudes de onda constituyentes y mide sus respectivas intensidades a fin de identificar los compuestos presentes en el líquido. El instrumento permitía que personas con poca preparación técnica pudiesen medir las pequeñas trazas de azúcares que se usan para identificar un vino. Harrison observó que también podía usarlo para distinguir las variedades de whisky, una tarea que de ordinario suele exigir voluminosos equipos de laboratorio. El instituto de Harrison, el SWRI, adquirió uno de estos espectrómetros portátiles para complementar sus métodos.

El químico David Ellis y sus colaboradores de la Universidad de Manchester, que colaboran con los investigadores del SWRI, están desarrollando otros métodos espectroscópicos para caracterizar el whisky escocés. Ellis explica que los productores y distribuidores de whisky «parecen especialmente interesados en métodos que puedan usarse a través de la botella». Las técnicas de su grupo tal vez permitan que, en un futuro, cualquiera pueda inspeccionar las botellas con rapidez y determinar si es seguro comprarlas o si, en su lugar, deberían enviarse a otros expertos para que las analicen con más detenimiento.

—*Lucas Laursen*



BOTÁNICA

Flora de alta montaña

Plantas tenaces adaptadas a la vida en el Everest

Las laderas superiores del monte Everest no son precisamente un lugar acogedor para la vida vegetal: la radiación ultravioleta incide con fuerza, la temperatura se desploma a diario por debajo del punto de congelación, y el suelo, pedregoso y helado, difícilmente puede ser calificado como fértil. Pero se acaban de descubrir tres nuevas especies capaces de sobrevivir en semejantes condiciones. Entre las plantas de alta montaña conocidas para la ciencia, estos especímenes (herborizados décadas atrás pero no estudiados hasta ahora) nos revelan adaptaciones únicas a la vida en el techo del mundo.

El 25 de mayo de 1952, una expedición suiza recolectó tres plantas en el Everest, a unos 6400 metros de altura. (La cumbre, conquistada por primera vez al año siguiente, se alza a 8848 metros.) Los ejemplares desecados acabaron en un herbario de Ginebra, donde permanecieron olvidados hasta 2017, cuando Cédric Dentant, botánico del Parque Nacional de los Écrins, en los Alpes franceses, los redescubrió.

Dentant identificó varios rasgos de estas plantas diminutas (de escasos centímetros) que, con gran probabilidad, explicaban su capacidad para sobrevivir en tan hostil entorno, señalaba el octubre pasado en *Alpine Botany*. Una poseía tallos que se enterraban y la anclaban en el terreno inestable; otra mostraba una forma almohadillada que limitaba la pérdida de calor y agua; y dos de ellas, según las notas del equipo de alpinismo de 1952, crecían en hendiduras de las rocas iluminadas por el sol, por lo que permanecían más calientes que el gélido entorno.

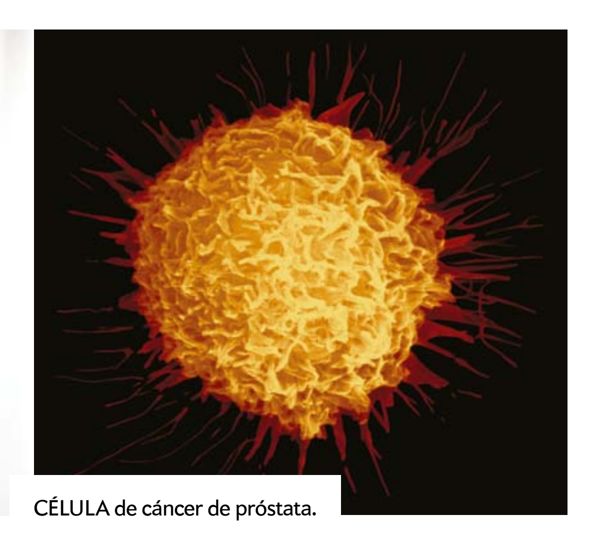
La ciencia ha estado a punto de perder la ocasión de estudiar estas plantas de alta montaña, apunta Sonja Wipf, ecóloga de vegetación alpina en el Instituto de Nivología y Aludes (SLF, por sus siglas en alemán) del Instituto Federal Suizo de Bosques, Nieve y Paisaje (WSL, por sus siglas en alemán), en Davos. «Y no precisamente porque crezcan en cornisas inaccesibles, sino por haber permanecido "enterradas" en un herbario.»

—*Katherine Kornei*

LEON HARRIS, GETTY IMAGES (*alambique*); DAN RAFLA, GETTY IMAGES (*Monte Everest*)



APARATO que identifica las proteínas.



CÉLULA de cáncer de próstata.

SALUD

Microscopio molecular

Una técnica innovadora permite escudriñar el interior de las células

Conocer el comportamiento de las proteínas en el seno de una célula humana nos puede indicar si esa célula vivirá, morirá o funcionará mal, una información que en ocasiones preanuncia la enfermedad. Pero esos datos tan minuciosos no resultan fáciles de obtener, porque los métodos actuales de análisis exigen una cantidad mínima de muestra, de cientos o miles de células. Ahora, sin embargo, miembros del Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL) han creado un microscopio molecular que detecta e identifica proteínas en muestras compuestas por un escaso número de células —incluso por una sola—, y lo han usado para distinguir entre el tejido enfermo y el sano.

El nuevo instrumento es capaz de analizar muestras tisulares 500 veces más pequeñas que las requeridas por otras técnicas de identificación de proteínas. En uno de los ensayos, se lograron detectar unas 650 proteínas en una sola célula de pulmón humana. En otro, se examinaron pequeños fragmentos de tejido pancreático humano en una placa de laboratorio para averiguar si procedían de una persona diabética o sana. (Las células enfermas del páncreas dejan de producir insulina, lo cual provoca la diabetes de tipo I.) Los investigadores también han empleado la técnica para identificar miles de proteínas en un reducido número de células sanas de cerebro, pulmón, hígado y útero. Esperan que este método conduzca a tratamientos más específicos y personalizados contra las enfermedades.

El aparato deposita primero muestras de tejido en minúsculos pocillos grabados en la superficie de un chip de vidrio. A continuación, un brazo robótico vierte en cada uno

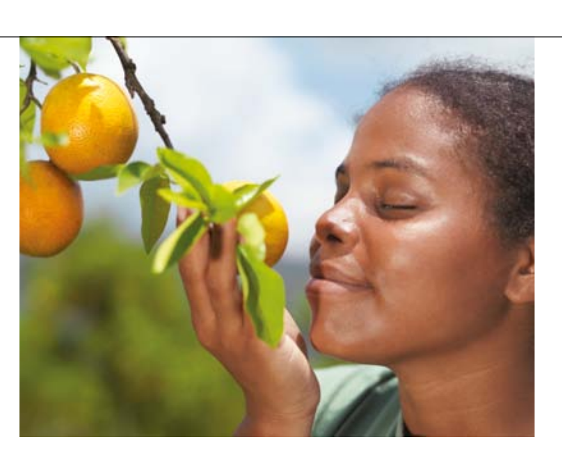
OLFATO

Matemáticas olorosas

Se emplea la geometría para cartografiar las afinidades entre las moléculas aromáticas

Para la nariz humana, distinguir entre el aroma de un café recién hecho y la fetidez de un huevo podrido es cosa sencilla, pero la bioquímica que se esconde tras ello es compleja. Ahora se acaba de crear un «mapa» olfativo, un modelo geométrico de cómo se combinan las moléculas para generar diversos aromas. Este mapa podría inspirar un modo de predecir cómo se percibirán ciertas combinaciones de olores y facilitar la elaboración de nuevas fragancias, afirman sus creadores.

Los especialistas intentan desde hace tiempo dominar el complicado panorama de las moléculas aromáticas. Los neurocientíficos quieren conocer mejor cómo procesamos los olores; los perfumistas y los fabricantes alimentarios ansían métodos más ágiles para sintetizar aromas familiares para sus productos. Este nuevo modelo podría ser de interés para ambos campos.



Un método usado para cartografiar el sistema olfativo consiste en agrupar las moléculas aromáticas dotadas de estructuras afines y predecir el olor de las nuevas combinaciones en virtud de esas semejanzas. Pero esa vía a menudo conduce a un callejón sin salida. «No siempre las sustancias con la misma estructura química son percibidas de forma similar», afirma Tatyana Sharpee, neurobióloga en el Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California, y autora principal del estudio, publicado en agosto en *Science Advances.*

Sharpee y sus colaboradores analizaron moléculas presentes en cuatro olores familiares e inconfundibles: fresas, tomates, arándanos y orina de ratón. Calcularon la frecuencia y la cantidad con las que aparecían ciertas moléculas juntas en esos olores. A continuación, elaboraron un modelo matemático en el que las moléculas que solían concurrir juntas aparecían próximas entre sí y las que raramente lo hacían aparecían distanciadas. El resultado fue una superficie con forma de «silla de montar», característica de un campo de las matemáticas denominado geometría hi-

ANDREA STARR, LABORATORIO NACIONAL DEL NOROESTE DEL PACÍFICO *(aparato)*; SCIENCE SOURCE *(célula tumoral)*; MONTY RAKUSEN, GETTY IMAGES *(olfato)*

gotitas de reactivos químicos destinados a extraer y aislar las proteínas. Después, el chip se introduce en un espectrómetro de masas para identificarlas. Hasta ahora, las técnicas de identificación de proteínas solo ofrecían una panorámica general de muestras grandes, pero no información detallada sobre las proteínas presentes en una sola célula o en grupos muy reducidos de ellas. «Ahora ya es posible aislar y analizar cada una de las agujas del pajar, mientras que antes había que analizar las agujas y el pajar a la vez», afirma el químico Ryan Kelly. Él y su colaborador Ying Zhu, ambos del PNNL, son los autores del estudio que vio la luz el pasado verano en *Angewandte Chemie*.

La principal razón por la que trabajar con muestras mínimas resulta tan arduo es la pérdida de material que tiene lugar en cada etapa del proceso. El nuevo sistema resuelve el problema con pocillos que reducen la superficie a la que se pueden adherir las proteínas. David Goodlett, químico de la Universidad de Maryland que no ha participado en la investigación, opina que es un gran paso adelante. Han ideado «una solución elegante al problema», opina.

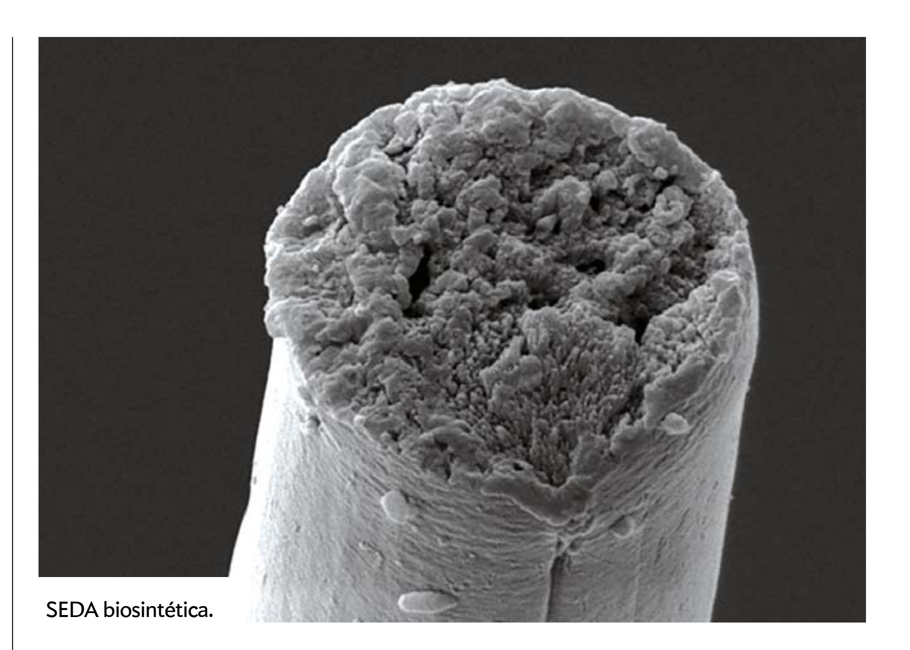
Los inventores están aplicando esta técnica para identificar proteínas en células tumorales solitarias que circulan por el torrente sanguíneo de pacientes con cáncer de próstata. La posibilidad de detectar detalles tan pequeños en esas células ayudará a saber por qué algunos tejidos enfermos adquieren resistencia a los fármacos.

—*Rachel Berkowitz*

perbólica, la cual obedece a principios distintos de la geometría que la mayoría aprendemos en la escuela.

Los investigadores imaginan un algoritmo, instruido en este modelo de geometría hiperbólica, que sea capaz de predecir el olor de las nuevas combinaciones de aromas, o que incluso ayude a sintetizarlos. Uno de los colaboradores de Sharpee, el neurocientífico del comportamiento Brian Smith, de la Universidad Estatal de Arizona, pretende usar este método para crear entornos olfativos en lugares desprovistos de aromas naturales.

Una herramienta así sería útil por igual para los científicos y los fabricantes de aromas, afirma el neurocientífico especializado en el olfato Joel Mainland, del Centro Monell de Química de los Sentidos, en Filadelfia, ajeno al estudio. El objetivo es saber lo suficiente acerca de cómo actúan los olores para reproducir aromas naturales sin las fuentes originales, explica. «Queremos obtener el aroma a fresa sin tener que preocuparnos de recrear los ingredientes que contiene esta fruta.» —*Stephen Ornes*



SEDA biosintética.

CHRISTOPHER BOWEN, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON EN ST. LOUIS

BIOLOGÍA SINTÉTICA

Imitar la seda de araña

Las fibras producidas por microbios genomodificados son tan fuertes y flexibles como las naturales

La araña teje un hilo que es el sueño de cualquier ingeniero. La seda es fuerte como el acero, flexible, atóxica y biodegradable. Pero su artífice no se presta a una crianza sencilla: cada una produce una cantidad minúscula y algunas especies son caníbales. Hace décadas que se intentan reproducir las hebras plateadas para fabricar suturas, indumentaria deportiva o chalecos antibalas, pero las fibras sintéticas no han satisfecho las expectativas. Ahora un equipo ha modificado bacterias para que produzcan seda tan tenaz y elástica como la versión natural.

Los investigadores habían trasplantado antes segmentos del ADN productor de la seda de las arañas en bacterias, gusanos de seda, plantas y hasta en cabras, en su intento por fabricar en masa la sustancia. Sin embargo, hasta ahora las mejores fibras artificiales solo eran la mitad de resistentes que la natural. El secreto de la solidez del hilo de la araña radica en las grandes moléculas proteicas, compuestas por cientos de tiras de aminoácidos repetidos que son codificadas por secuencias de ADN repetitivas de longitud similar. Pero «en general, a la naturaleza no le gusta el ADN repetitivo y encuentra la manera de deshacerse de él», explica Fuzhong Zhang, profesor de ingeniería química, ambiental y energética en la Universidad de Washington en San Luis. Las arañas han sabido estabilizar el ADN grande, pero en otros seres vivos esas unidades repetidas son troceadas o modificadas.

A fin de eludir el problema, Zhang y sus colaboradores alteraron el ADN arácnido que interviene en la fabricación de las proteínas de la seda. Microbios portadores de este ADN modificado sintetizaron las moléculas proteicas de la seda incorporando en ellas un «adhesivo» único. Este une dos moléculas para formar la larga cadena deseada y después se desprende. Las proteínas resultantes son más largas que las naturales de mayor longitud. Acto seguido, los investigadores convirtieron esas proteínas en polvo y las mezclaron en una solución que puede ser hilada en fibras tan fuertes como las naturales, según dieron a conocer en septiembre en *Biomacromolecules*.

Según Zhang, la seda sintética puede convertirse en una alternativa sostenible a las fibras derivadas del petróleo, como el nailon. Ahora el reto estriba en fabricarla en cantidad suficiente a un coste económico. El nuevo método ha de superar aún ese problema, porque la solución de hilado se obtiene con un disolvente corrosivo y caro, matiza Gregory Holland, profesor de química y bioquímica en la Universidad Estatal de San Diego, que no ha participado en el proyecto. «El paso siguiente consistirá en trabajar con una solución [acuosa] para ver si es factible producir fibras con prestaciones similares», concluye el experto.

—*Prachi Patel*



TRANSPORTE

Predecir la niebla

Las señales de las antenas de telefonía móvil pueden vaticinar las condiciones de visibilidad mejor que los satélites

La niebla puede provocar colisiones y accidentes, sobre todo en puertos, aeropuertos y carreteras. Por ello, hacer un seguimiento en tiempo real de las condiciones de visibilidad ayudaría a mejorar la seguridad y ahorraría decenas de millones solo en el sector del transporte. Sin embargo, los sistemas habituales para detectar la niebla, como los satélites, los sensores de visibilidad y la propia observación humana, adolecen a menudo de una baja resolución espacial, de un coste elevado o de una sensibilidad deficiente cerca del suelo, donde la vigilancia es más importante.

Ahora, los ingenieros Noam David y H. Oliver Gao, hasta hace poco ambos en Cornell, han propuesto un método que aprovecha la señal de las antenas de telefonía móvil para detectar las condiciones atmosféricas que propician la niebla. Entre las redes de antenas, los datos inalámbricos se transmiten en forma de microondas. Pero la intensidad de esta radiación depende de las condiciones meteorológicas, lo que ofrece la posibilidad de vigilar la niebla de manera económica e ininterrumpida.

A partir de esta idea, David y Gao lograron predecir la presencia de niebla en una franja de tierra cercana a Tel Aviv con una antelación de hasta una hora. Para ello, identificaron las alteraciones que sufren las señales de microondas como respuesta a los cambios de temperatura y humedad. Además, gracias al modo en que las gotas de niebla atenúan las señales, demostraron que podían detectar la niebla en aquellos momentos en que las nubes bloquean la visión de los satélites. Y, a diferencia de estos, el nuevo método también distingue entre las nubes bajas y la niebla a ras de suelo. Estos resultados aparecieron en sendos estudios publicados este año en las revistas *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* y *Natural Hazards*.

Dado que hoy las redes móviles están por todo el mundo, la técnica podría implantarse con facilidad en la mayoría de las regiones del planeta. «En principio, ya podríamos utilizar las infraestructuras actuales para detectar anticipadamente y a diario la formación de niebla», aclara David. «Y, dado que es posible recibir los datos en tiempo real, podemos imaginarnos un sistema de alerta temprana a corto plazo contra la niebla.» David es partidario de efectuar pruebas rigurosas en varias partes del mundo para estudiar las limitaciones del método.

El nuevo trabajo demuestra que es posible detectar las sutiles condiciones que preceden a la formación de niebla. Kelly Caylor, científico ambiental de la Universidad de California en Santa Bárbara que no participó en el trabajo, lo define como «un importante paso adelante». «Hay algo extraordinario y muy satisfactorio en encontrar tanta información en lo que normalmente consideraríamos ruido», concluye el experto.

—*Rachel Berkowitz*

PAOLO TOFFANIN, GETTY IMAGES (*avión*); CASA DE LA CIENCIA DE SEVILLA

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de diciembre
Convivir entre contaminación: Polución, salud y enfermedad
Varios ponentes
Organiza: Sociedad Catalana de Biología
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
scb.iec.cat

13 de diciembre
Supernovas: Crónica de una muerte anunciada
Margarita Hernanz Carbó, Instituto de Ciencias del Espacio
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es/es/museu-de-les-ciencies

18 de diciembre
Dioses, héroes y constelaciones: Cosmografía y mitos de la cerámica griega
David Barrado, Centro de Astrobiología
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
culturaccosmos.es

EXPOSICIONES

Fritz Haber: Cara y cruz de un premio nóbel
Biblioteca de Física y Química
Universidad de Barcelona
Barcelona
cari.ub.edu

Más allá de 2001: Odiseas de la inteligencia
La inteligencia artificial a través de la mirada de Kubrick
Espacio Fundación Telefónica
Madrid
espacio.fundaciontelefonica.com

Veneno
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es



OTROS

4 y 18 de diciembre — Proyección
Nanocosmos: Un viaje a lo pequeño
Museo Elder de la Ciencia y la Tecnología
Las Palmas
www.museoelder.org

MATEMÁTICAS

El gran encuentro de las matemáticas mundiales

Las ecuaciones en derivadas parciales y la dinámica de fluidos, dos de los protagonistas del 28.º Congreso Internacional de Matemáticos

DIEGO CÓRDOBA Y ÁGATA TIMÓN GARCÍA-LONGORIA



LOS CUATRO GALARDONADOS con las medallas Fields en el 28.º Congreso Internacional de Matemáticos. De izquierda a derecha: Caucher Birkar, Alessio Figalli, Peter Scholze y Akshay Venkatesh.

El pasado mes de agosto tuvo lugar en Río de Janeiro la 28.ª edición del Congreso Internacional de Matemáticos (ICM, por sus siglas en inglés). Organizado una vez cada cuatro años desde 1897 (únicamente con interrupciones debidas a las guerras mundiales), esta fue la primera vez que se celebró en el hemisferio sur. Del 1 al 9 de agosto se sucedieron más de un centenar de charlas en las que se presentaron los avances más relevantes de los últimos años en la disciplina. Pese a la tremenda especialización de la investigación actual, que hace cada vez más difícil la comunicación entre expertos incluso de ramas cercanas, el ICM sigue suponiendo el gran encuentro internacional de la comunidad matemática.

Como es habitual, la Unión Matemática Internacional, organizadora del congreso, entregó las medallas Fields, a menudo consideradas el «Nobel de las matemáticas». Estas fueron otorgadas a Caucher Birkar (40 años), de la Universidad de Cambridge; Alessio Figalli (34), de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich; Peter Scholze (30), de la Universidad de Bonn, y Akshay Venkatesh (36), de Stanford. Sus investigaciones se centran en campos variados: geometría aritmética, geometría algebraica, teoría de números y ecuaciones en derivadas parciales (EDP). Esta última disciplina, representada en particular por Figalli, ha sido una de las protagonistas del congreso.

Modelizar la naturaleza

Muchas de las EDP más interesantes provienen de la modelización de fenómenos físicos, como la difusión del calor a través de un sólido o la propagación del sonido de las cuerdas de una guitarra. También se usan para estudiar problemas en elasticidad, electromagnetismo, dinámica de fluidos o mecánica cuántica, entre otros muchos ámbitos. Como no siempre resulta posible disponer de soluciones explícitas a estas ecuaciones, los investigadores han desarrollado todo tipo de nuevas herramientas para estudiarlas.

Koji Ohkitani, experto en dinámica de fluidos de la Universidad de Sheffield, empleaba la siguiente analogía: «Los analistas perfeccionan la técnica, como carniceros afilando un cuchillo; entonces, cuando otros vean que esas ideas se pueden aplicar a una EDP concreta, cortarán la carne con el mejor cuchillo disponible». Por mencionar dos ejemplos históricos, las series de Fourier, que se concibieron

en su día para entender la ecuación del calor, o el cálculo de variaciones, que estudia los máximos y los mínimos de funcionales (como la energía de un sistema), constituyen hoy grandes campos de investigación con independencia de sus aplicaciones a las EDP.

Uno de los doce conferenciantes plenarios de este ICM, Luigi Ambrosio, de la Escuela Normal Superior de Pisa, emplea ambos enfoques: afila el cuchillo y corta la carne. Ambrosio fue director, junto al también medallista Fields Cédric Villani, de la tesis de Figalli, y ha sido una figura clave en el desarrollo del análisis matemático en las últimas décadas. En concreto, ha efectuado contribuciones de gran relevancia al cálculo de variaciones y a la teoría de la medida geométrica. Las nuevas técnicas desarrolladas por Ambrosio han resultado ser de gran utilidad para atacar problemas en ecuaciones elípticas y parabólicas no lineales.

Otra de las conferenciantes plenarias, Sylvia Serfaty, del Instituto Courant de Ciencias Matemáticas de Nueva York, ha resuelto problemas variacionales y de EDP que provienen de diversos modelos físicos. Una de sus contribuciones más destacadas ha sido el desarrollo de la teoría analítica de las ecuaciones de Ginzburg-Landau, que modelizan el comportamiento de los superconductores. En particular, Serfaty ha demostrado que las soluciones de estas ecuaciones contienen vórtices (estructuras similares a remolinos).

En la sección de EDP se han abordado otras cuestiones, como el estudio de sistemas dinámicos hiperbólicos, la ecua-

LAS NUEVAS ESTRELLAS DE LAS MATEMÁTICAS

COMO EN CADA EDICIÓN DESDE 1936, durante el Congreso Internacional de Matemáticos (ICM) de este año se entregaron las medallas Fields. Unánimemente consideradas como uno de los mayores reconocimientos en la disciplina, estos galardones se entregan a investigadores de menos de 40 años que hayan destacado por sus aportaciones recientes al campo. A continuación se describe el perfil de cada uno de los condecorados.

Caucher Birkar (Irán, 1978)
Este catedrático de la Universidad de Cambridge nació y creció en un pueblo agrícola de la región kurda del oeste de Irán. En sus años de escuela, marcados por la guerra con Irak, su hermano mayor comenzó a enseñarle matemáticas avanzadas; fue él la persona que más le influyó en su formación y quien le animó a dedicarse a las matemáticas. Tras terminar sus estudios en la Universidad de Teherán, en el año 2000 se trasladó al Reino Unido, donde consiguió el estatus de refugiado y pudo realizar el doctorado en la Universidad de Nottingham.



Sus contribuciones más destacadas pertenecen al campo de geometría algebraica. Una de las ramas más veteranas de las matemáticas, esta área estudia las propiedades de las variedades algebraicas: aquellos conjuntos de puntos que satisfacen una o más ecuaciones polinómicas. Birkar trabaja en geometría birracional, que trata de clasificar dichas variedades en un pequeño número de familias. «El problema principal es mostrar que toda variedad puede transformarse [...] en una construida con tres tipos de bloques», explicaba el propio investigador en el ICM.

Alessio Figalli (Italia, 1984)
Catedrático en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich desde 2016, Figalli realizó su doctorado en la Escuela Normal Superior de Pisa bajo la supervisión de Luigi Ambrosio y Cédric Villani, matemático de la Escuela Normal Superior de Lyon y medallista Fields en 2010.

El área de especialización de Figalli son las ecuaciones en derivadas parciales (EDP). El jurado destacó sus trabajos sobre teoría del transporte óptimo, la cual se centra en estudiar la distribución de elementos de un punto a otro con el menor coste posible. Sus aplicaciones van desde la transmisión del oxígeno a las células hasta el reparto de mercancías entre un almacén central y una cadena de supermercados. En particular, Figalli ha aplicado ideas de este campo al estudio de las EDP.

Peter Scholze (Alemania, 1987)
Es uno de los medallistas Fields más jóvenes de todos los tiempos y está considerado uno de los matemáticos más brillantes de su generación. Fue el catedrático más joven de la historia de Alemania (con 24 años) y recientemente ha sido nombrado director del Instituto Max Planck de Matemáticas de Bonn.

De su trabajo, el jurado destacó «la revolución que ha provocado en geometría aritmética», una disciplina que une la teoría de números y la geometría algebraica. Scholze es el creador de los «espacios perfectoides», los cuales se han convertido en una fructífera herramienta para resolver varias conjeturas abiertas en el campo y, en particular, en el llamado «programa de Langlands». Este constituye desde hace años una de las principales líneas de investigación en teoría de números, y pretende relacionar conceptos matemáticos que hasta hace poco se consideraban independientes.

Akshay Venkatesh (India, 1981)
Nacido en Nueva Deli, Venkatesh se crío en la ciudad australiana de Perth, a la que se mudó poco después de nacer. Con 13 años ingresó en la Universidad de Australia Occidental y con 16 se trasladó a la de Princeton, en EE. UU., para cursar un doctorado en teoría de números.

A lo largo de su carrera ha realizado aportaciones que relacionan esta disciplina con otros campos aparentemente distantes, como la topología algebraica y los sistemas dinámicos. Ha resuelto varios casos relevantes de una versión débil de la hipótesis de Riemann generalizada, y ha hecho varias contribuciones al estudio de las ecuaciones diofánticas, aquellas cuyos coeficientes son números enteros y de las que se buscan soluciones también enteras. En la actualidad es catedrático en Stanford.

ción no lineal del calor, los modelos de crecimiento de cristales, las ecuaciones en derivadas parciales estocásticas, la dinámica de solitones para ecuaciones dispersivas y la dinámica de fluidos. Seis de las 16 conferencias de esta sección se han dedicado a este último tema, un campo muy extenso que utiliza ideas de la física, la modelización, el análisis matemático y el análisis numérico.

La complejidad de los fluidos

La dinámica de fluidos constituye un área de gran actividad en la matemática contemporánea. Presenta una larga historia, pues en ella han trabajado grandes científicos desde sus inicios, que se remontan a Arquímedes. En el siglo XVII, Isaac Newton fue el primero en aplicar sus leyes de la mecánica al movimiento de los flujos, y además desarrolló el cálculo diferencial, que proporciona el lenguaje que permite expresar dicho movimiento. Sin embargo, fue el célebre Leonhard Euler quien, en 1755, escribió por primera vez el sistema de ecuaciones que describen la evolución de un fluido ideal (es decir, sin rozamiento e incompresible).

Sin embargo, y a pesar de todas las mentes brillantes que desde entonces han abordado su estudio, la complejidad de las ecuaciones de Euler es tal que aún persisten varios retos de primer orden. Por ejemplo, ni siquiera se ha podido demostrar la existencia de soluciones únicas. Eso significa que, matemáticamente, no podemos garantizar que, partiendo de los mismos datos iniciales, un flujo siempre vaya a exhibir el mismo comportamiento.

Tampoco se sabe si, aun comenzando con condiciones óptimas, las soluciones de las ecuaciones de Euler podrían perder su regularidad inicial y dar lugar a comportamientos abruptos, conocidos como «singularidades». De esta forma, partiendo de un sistema sin comportamientos bruscos, podrían formarse remolinos. Uno de los principales problemas abiertos consiste en determinar cuáles deberían ser las condiciones iniciales (regulares) que tendría que adoptar un fluido para que acaben formándose remolinos en un tiempo finito. Este es precisamente el reto que plantea uno de los célebres Problemas del Milenio, solo que aplicado al caso de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales se obtienen a partir de las de Euler incorporando la viscosidad. Por ahora, la cuestión permanece abierta.

Análisis y simulaciones

Pese a ello, en las últimas décadas se han logrado varios avances al respecto. En el ICM de este año se han presentado distintos resultados relativos a la formación de singularidades, a la existencia global de soluciones y a la relación entre los fluidos viscosos y los no viscosos. Uno de nosotros (Córdoba) impartió una conferencia invitada sobre la formación de cierto tipo de singularidades que se producen en la superficie de separación de dos líquidos inmiscibles (como el aceite y el agua). Dichas singularidades permiten explicar con detalle cómo las olas crecen, giran o se derrumban, así como el proceso de división de una gota en dos.

El estudio de los fluidos presenta enormes retos debido a que, en general, se trata de sistemas inestables (en los que pequeñas perturbaciones pueden cambiar por completo la configuración del sistema), no lineales (las respuestas no son proporcionales al estímulo que las provoca) y no locales (lo que ocurre en un punto no depende solo de lo que sucede en su entorno inmediato, sino del estado de todo el fluido). A lo largo de los años, estas dificultades han hecho que para analizar estos sistemas no solo se empleen complejas técnicas analíticas, sino también simulaciones numéricas; es decir, soluciones aproximadas con la ayuda de un ordenador, las cuales permiten entender las propiedades de las soluciones.

Un ejemplo destacado es el programa desarrollado por el grupo de investigación en ecuaciones diferenciales, análisis numérico y aplicaciones (EDANYA) de la Universidad de Málaga, que simula la evolución de tsunamis en el Mediterráneo. La evolución de un tsunami viene determinada por EDP no lineales y no locales. Su solución explícita se ignora, por lo que se emplean soluciones aproximadas. Hasta hace poco, sin embargo, las simulaciones por ordenador tardaban días en proporcionar resultados precisos, lo que hacía impracticable su uso. Ahora, gracias al trabajo del grupo EDANYA, el tiempo de cómputo ha logrado reducirse a unos pocos minutos. Uno de sus miembros, Manuel Castro, impartió una conferencia en la sección de análisis numérico y simulaciones del congreso. Córdoba y Castro han sido los únicos representantes españoles en el programa científico del ICM.

Matemáticas y sociedad

En total, a Río acudieron unos 3000 matemáticos de 114 países, una cifra considerablemente inferior a la de la edición anterior, celebrada en Seúl y a la que asistieron más de 5000 investigadores. En 2014, la mitad de los asistentes procedían de Corea del Sur. En Brasil, sin embargo, debido a los recortes en ciencia sufridos durante los últimos años, la presencia de matemáticos locales fue relativamente baja. Tampoco hubo lugar para ningún matemático latinoamericano entre los nuevos ganadores de la medalla Fields. Tras el reconocimiento de Artur Ávila en 2014, el primer latinoamericano en conseguirla, muchos esperaban que los premios continuaran destacando el talento fuera de las grandes instituciones europeas y estadounidenses. Esta vez tampoco se ha premiado a ninguna mujer, con lo que la iraní Maryam Mirzakhani, tristemente fallecida en 2017, sigue siendo por el momento la única de la lista. Veremos qué sucede dentro de cuatro años en San Petersburgo, donde tendrá lugar el próximo ICM.

Diego Córdoba *es profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT) de Madrid.*

Ágata Timón García-Longoria *es responsable de comunicación y divulgación en el ICMAT.*

PARA SABER MÁS

What makes the hardest equations in physics so difficult? Kevin Hartnett en *Quanta Magazine*, 16 de enero de 2018. Disponible en **www.quantamagazine.org/what-makes-the-hardest-equations-in-physics-so-difficult-20180116**

Interface dynamics for incompressible fluids: Splash and splat singularities. Diego Córdoba en *Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2018*, vol. 2, págs. 2187-2208 (en prensa).

A review of higher order well-balanced path-conservative finite volume schemes for geophysical flows. Manuel J. Castro et al. en *Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2018*, vol. 3, págs. 3499-3522 (en prensa).

EN NUESTRO ARCHIVO

El horizonte visible de las matemáticas. Ágata Timón García-Longoria y David Fernández en *IyC*, noviembre de 2014.

Vórtices anudados en fluidos ideales. Alberto Enciso y Daniel Peralta-Salas en *IyC*, junio de 2015.

El turbulento viaje de la energía. José I. Cardesa, Alberto Vela-Martín y Javier Jiménez en *IyC*, mayo de 2018.

ARQUEOLOGÍA

La llegada de nuestros ancestros a Asia

Herramientas recién halladas en China de 2,1 millones de años de antigüedad indican que los homininos salieron de África antes de lo que se pensaba

JOHN KAPPELMAN



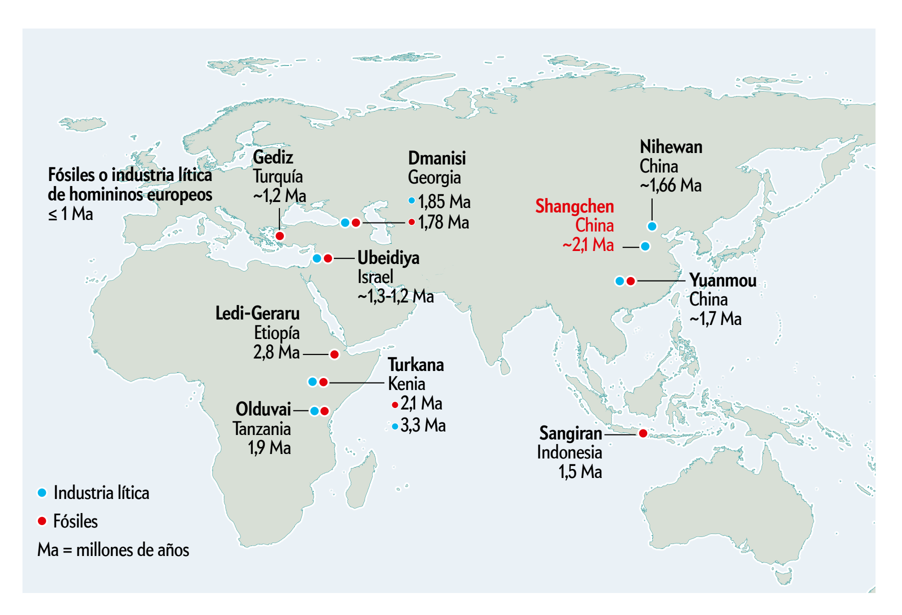
LOS GUIJARROS Y LASCAS hallados en el yacimiento de Shangchen, en la meseta china de Loes, revelan la presencia de nuestros ancestros en Asia hace más de dos millones de años. (La imagen muestra solo una selección de los útiles líticos analizados. Las escalas están graduadas en centímetros.)

Imaginemos un mundo en el que casi no hubiese humanos. El tema suele explorarse en las obras de ciencia ficción postapocalíptica, pero así fue la Tierra durante la mayor parte de su historia, hasta que salieron de África los primeros homininos (miembros de la clase taxonómica que comprende a los humanos, a las especies extintas del género *Homo* y a otros primates bípedos cercanos) para adentrarse en territorios desconocidos y terminar poblando todo el planeta. ¿Qué homininos emprendieron aquel viaje? ¿Cómo y cuándo emigraron? ¿Qué rutas siguieron? Las investigaciones que estudian sobre el terreno esa diáspora ancestral aportan algunas respuestas, además de indagar en el comportamiento de aquellos homininos. Zhaoyu Zhu, de la Academia China de las Ciencias, y sus colaboradores han presentado en *Nature* el descubrimiento de indicios de la presencia de homininos en China hace más de dos millones de años, lo que revela que salieron de África antes de lo que se creía.

La antigüedad de los restos

Para determinar con certeza la aparición de una especie en un momento dado, hacen falta pruebas irrebatibles de su presencia, además de corroborar la edad del material geológico que contiene el espécimen. Los restos de especies muy extendidas en su hábitat suelen encontrarse con facilidad en los yacimientos fósiles. No ocurre lo mismo con los restos de homininos antiguos. Dado que sus poblaciones probablemente eran escasas, hay muy pocos restos fosilizados (una falange de un dedo puede bastar para documentar la presencia de un hominino). Sin embargo, hace al menos 3,3 millones de años, los homininos comenzaron a fabricar utensilios de piedra, así que las lascas y los guijarros que tallaron también sirven para atestiguar su presencia.

Hasta ahora, el yacimiento de homininos más antiguo que se conocía fuera de África era el de Dmanisi (Georgia), donde se encontraron restos asombrosos de varios individuos y herramientas líticas



DE ÁFRICA A EURASIA. Los fósiles de homininos o las herramientas que empleaban, hallados en distintos yacimientos, sirven para rastrear el camino que emprendieron nuestros ancestros tras abandonar el continente africano. Recientemente se han descubierto en Shangchen (China) restos de industria lítica de unos 2,1 millones de años, la edad más antigua conocida de la presencia de los homininos fuera de África.

de entre 1,85 y 1,78 millones de años de antigüedad. También se han investigado a fondo otros emplazamientos con indicios de actividad de homininos, desde la Europa occidental hasta el Asia oriental. El equipo de Zhu describe la presencia de homininos en Shangchen, en la meseta china de Loes, tras haber hallado herramientas de piedra en capas de sedimento datados en 2,1 millones de años.

La antigüedad de muchos yacimientos se ha calculado con métodos como la datación radiométrica o las huellas químicas de las rocas volcánicas. Pero, puesto que en Shangchen no hay este tipo de rocas, Zhu y sus colaboradores han recurrido a la datación paleomagnética para analizar capas de paleosuelos (suelos fosilizados) y loes (depósitos limosos de origen eólico). La técnica se basa en las inversiones aleatorias del campo magnético de la Tierra, cuando el polo norte magnético pasa a ser el polo sur, y viceversa. Los minerales magnéticos presentes en el sedimento actúan como diminutas brújulas que registran la polaridad y, cuando los sedimentos se convierten en roca, la polaridad de ese momento queda grabada en esta. Las fluctuaciones de polaridad fijadas en las capas de sedimento se comparan con una escala cronológica de referencia, denominada escala de polaridad geomagnética, o GPTS (por sus siglas en inglés).

Las herramientas de Shangchen

El yacimiento chino está surcado por profundos taludes rocosos cubiertos de vegetación, así que obtener muestras allí significa, literalmente, asomarse al abismo. Los datos de los autores guardan una correlación convincente con la escala GPTS, sobre la cual el equipo ha identificado dos períodos notables (el breve subcrono de Reunión y el posterior y más prolongado subcrono de Olduvai) que enmarcan la capa en la que se incluyen los artefactos más antiguos. ¿Podemos estar seguros de que encontraran las herramientas más antiguas del yacimiento? La capacidad del equipo de sondear las capas más profundas se vio limitada por la actividad agrícola de los campos; para llegar hasta esas capas harán falta más excavaciones.

Los 96 útiles líticos que analizó el equipo de Zhu consistían sobre todo en lascas y guijarros pequeños que contrastaban nítidamente con el material de grano fino que los rodeaba. Los autores suponen que las rocas fueron traídas desde las montañas de Qinling, al sur del yacimiento. Si pudiese determinarse su origen exacto, se podría recabar información importante sobre las distancias que recorrían aquellos homininos para transportar la materia prima.

Los utensilios tienen formas sencillas: los núcleos de piedra, del tamaño de la palma de una mano, fueron tallados para desprender pocas lascas, algunas de las cuales se afilaron luego, mientras que los guijarros quizá sirvieron de percutores. Esas características vinculan estrechamente los objetos de Shangchen con los de la misma edad hallados en África. Los autores no indican que las esquirlas coincidan entre sí o con los núcleos de piedra de las que fueron talladas, así que es posible que fuesen fabricadas en otro lugar. No obstante, puesto que la inclinación del terreno no permitió mayores excavaciones, todavía habrá que examinar esta cuestión en detalle.

¿Para qué se usaban las herramientas líticas? Los investigadores explican que encontraron restos de animales cerca de los instrumentos más antiguos, concretamente huesos de bóvidos (la familia que comprende los antílopes y las vacas), cérvidos (ciervos) y suidos (cerdos), pero no comentan si esta asociación demuestra que las herramientas sirvieran para descuartizarlos. Para valorar dicha posibilidad habría que detectar los siguientes signos: en los huesos, incisiones que evidenciaran que se arrancó la carne con instrumentos o marcas de fracturas que indicaran que fueron martilleados para extraer el tuétano; en las herramientas, desgaste o residuos biológicos. Si este punto se investiga en el futuro, puede que la limpieza de los artefactos desenterrados dificulte la aplicación de técnicas como el estudio de los residuos.

Migraciones del pasado

Los homininos aparecieron en África, posiblemente hace más de seis millones de años. Puesto que en Eurasia no hay yacimientos de homininos correspondientes a la primera parte de este período ni fósiles atribuibles a géneros como *Australopithecus* y *Paranthropus*, descubiertos en África y datados hasta en un millón de años, se da por supuesto que el primer hominino en abandonar el continente fue una especie del género *Homo*. El fósil africano atribuido a *Homo* más antiguo que se conoce es una mandíbula de 2,8 millones de años encontrada en Etiopía, de modo que la emigración africana no puede ser anterior a esa fecha, aunque por supuesto sí puede ser posterior.

Los homininos probablemente se dispersaron bajo los climas variables de la glaciación del Pleistoceno. ¿Su migración a latitudes altas implica que evolucionaron para adaptar su comportamiento a un

clima más frío? Tal vez. La interpretación clásica sostiene que los paleosuelos de la meseta de Loes se desarrollaron durante unas condiciones favorables de temperatura y humedad, mientras que el loes se formó en épocas más frías y secas, lo cual quizá resulte una simplificación. Pero en Shangchen las capas de paleosuelo que contienen herramientas líticas doblan en número a las de loes. Cabe suponer, por tanto, que la población de homininos creció o se contrajo en función del clima, en lugar de ocupar la meseta de forma permanente.

Los 14.000 kilómetros que separan África del Asia oriental representan una expansión descomunal del área de distribución geográfica. Aquella diáspora probablemente se vio facilitada por los incrementos demográficos que se producían al colonizar nuevos territorios y llenar nichos vacíos, aunque también pudo estar motivada por el agotamiento de recursos que sigue explicando la gran movilidad de los cazadores-recolectores actuales. No obstante, aun cuando la marcha alcanzase un ritmo de 5 a 15 kilómetros por año, valor que queda comprendido con holgura en el área de alimentación diaria de los cazadores-recolectores modernos, solo habrían hecho falta entre 1000 y 3000 años para recorrer la distancia entre África y Asia. Los yacimientos documentados hasta la fecha y las técnicas de datación actuales no bastan para esclarecer una dispersión de tal velocidad ni para determinar la forma exacta en que se produjo, pero sin duda podemos confiar en que los nuevos hallazgos permitirán resolver este misterio migratorio.

John Kappelman *es profesor en los departamentos de Antropología y Ciencias Geológicas de la Universidad de Texas en Austin.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 559, págs. 480-481, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Out of Africa I. John G. Fleagle et al. (eds.) Springer, 2010.

Earliest human occupations at Dmanisi (Georgian Caucasus) dated to 1.85–1.78 Ma. Reid Ferring et al. en *PNAS*, vol. 108, n.° 26, págs. 10432-10436, junio de 2011.

Early *Homo* at 2.8 Ma from Ledi-Geraru, Afar, Ethiopia. Brian Villmoare et al. en *Science*, vol. 347, n.° 6228, págs. 1352-1355, marzo de 2015.

Hominin occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 million years ago. Zhaoyu Zhu et al. en *Nature*, vol. 559, n.° 7715, págs. 608-612, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

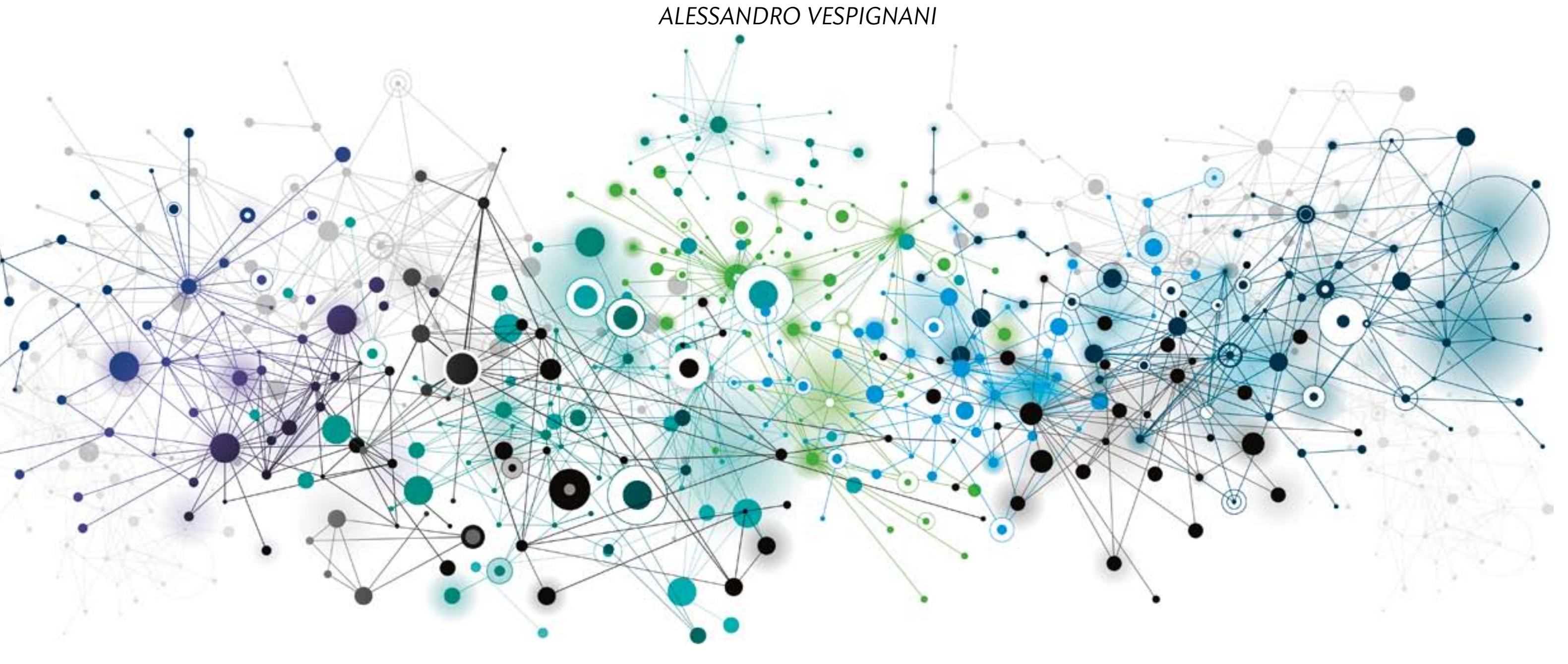
Migraciones prehistóricas de África a Eurasia. Kate Wong en *IyC*, abril de 2004.

SISTEMAS COMPLEJOS

La ciencia de redes cumple 20 años

La idea de que cualquier persona del mundo está conectada con cualquier otra por medio de una cadena de tan solo seis conocidos fue explicada matemáticamente hace dos décadas. Lo que en su momento pareció ser un hallazgo circunstancial acabaría teniendo enormes repercusiones

ALESSANDRO VESPIGNANI



REDES Y FENÓMENOS COMPLEJOS: Una red no es más que una estructura formada por un conjunto de nodos unidos entre sí mediante enlaces. Estas representaciones se emplean para analizar todo tipo de fenómenos biológicos, sociales y tecnológicos, desde las interacciones entre proteínas hasta el contagio de enfermedades o las comunicaciones por Internet.

En 1998, Duncan Watts y Steven Strogatz, por entonces ambos en la Universidad Cornell, presentaron un modelo de redes conocido como «mundo pequeño». Dicho modelo reconciliaba las propiedades de agrupamiento y de distancias entre nodos que exhiben muchas de las redes que encontramos cada día. Como físico estadístico, aún recuerdo las discusiones que surgieron al respecto: su trabajo resultaba interesante, pero no parecía ser más que una variante exótica de las redes regulares a las que todos estábamos acostumbrados por aquel entonces.

Sin embargo, a medida que científicos de diferentes campos fueron asimilando la idea, se hizo evidente que el modelo de Watts y Strogatz encerraba profundas implicaciones para entender la dinámica y las transiciones de fase en todo tipo de fenómenos, desde los procesos de contagio hasta la difusión de información. Su trabajo marcó el inicio de una nueva era que acabaría consagrando la ciencia de redes como un campo multidisciplinar.

Mundos pequeños

Antes de que Watts y Strogatz publicaran su artículo, los algoritmos usados para describir el crecimiento de una red se basaban en procesos como el propuesto décadas antes por los matemáticos Paul Erdös y Alfréd Rényi. Dichos procesos se caracterizan por una falta de conocimiento sobre los principios que guían la creación de nuevos enlaces, y parten de la suposición de que dos nodos pueden conectarse al azar con una probabilidad dada. Ello genera redes aleatorias, en las que la longitud media del camino entre dos nodos (definida como el número más pequeño de enlaces que deben recorrerse para llegar de un nodo a otro) viene dada por el logaritmo del número total de nodos. Como consecuencia, las redes aleatorias permiten explicar una de las propiedades del fenómeno de mundo pequeño, popularizado en los años sesenta por Stanley Milgram y también conocido como «seis grados de separación»: la idea de que cualquier persona del planeta está conectada con cualquier otra a través de una cadena de, como mucho, seis conocidos.

Sin embargo, la construcción aleatoria no reproduce el elevado grado de agrupamiento que se observa en las redes reales. Este fenómeno queda ejemplificado por el lema «los amigos de mis amigos son mis amigos»: la probabilidad de que tres personas sean todas amigas entre sí en una red social es generalmente mucho más alta de lo que cabría esperar en una red construida a partir de un proceso puramente aleatorio.

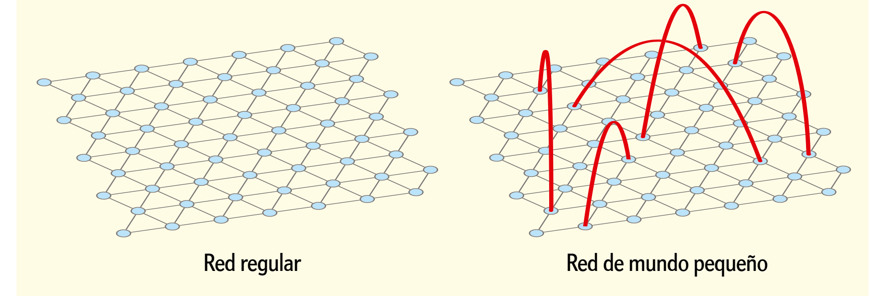
Para superar ese conflicto entre aleatoriedad y agrupamiento, Watts y Strogatz propusieron un modelo cuyo punto de inicio era una red regular (una en la que el esquema de conexiones de un nodo y sus vecinos se repite para todos los nodos, como por ejemplo en una retícula cuadrada) con un alto grado de agrupamiento. Después, permitieron que los enlaces se redistribuyeran entre los nodos de manera aleatoria, con una probabilidad de «recableado» (p) fija para todos los enlaces. Al variar p, el modelo interpolaba entre una

red regular ($p \to 0$) y una completamente aleatoria ($p \to 1$).

Para valores muy pequeños de p, la red resultante es una malla regular con un alto grado de agrupamiento. Sin embargo, para valores modestos de este parámetro comienzan a aparecer atajos entre nodos distantes, lo que reduce de manera drástica la distancia promedio entre pares de nodos. Watts y Strogatz mostraron que, para un amplio intervalo de valores de p, era posible encontrar redes que exhibiesen un agrupamiento elevado y, a la vez, una distancia corta entre nodos. Ello reconciliaba el alto agrupamiento de la red con el fenómeno de mundo pequeño.

CÓMO CONSTRUIR UN MUNDO PEQUEÑO

EN 1998, DUNCAN WATTS Y STEVEN STROGATZ describieron un modelo de generación de redes que permitía explicar muchas de las propiedades observadas en las redes del mundo real. Dicho modelo partía de una red regular; es decir, una en la que el patrón de conexiones entre un nodo y sus vecinos es idéntico para todos los nodos (*izquierda*). Después, permitía que los enlaces ya existentes se redistribuyesen al azar (*derecha*), de modo que comenzaban a surgir atajos entre nodos distantes (*rojo*). Dicho proceso daba lugar al fenómeno de «mundo pequeño»: dos nodos cualesquiera pueden siempre conectarse a través de una cadena formada por muy pocos enlaces, al tiempo que los nodos vecinos de cualquier nodo se encuentran muy enlazados entre sí.



Una nueva ciencia

En un principio, el modelo de Watts y Strogatz fue considerado una mera explicación del fenómeno de seis grados de separación. Sin embargo, su mayor impacto probablemente fuera allanar el camino a otros estudios sobre la manera en que la estructura de una red influye en el tipo de fenómenos dinámicos que esta puede soportar.

Poco después llegó otro trabajo fundamental: en 1999, Albert-László Barabási y Réka Albert propusieron el modelo de crecimiento de redes conocido como «enlazamiento preferencial». En este, los nuevos nodos que se van añadiendo a una red quedan enlazados preferentemente con aquellos que ya presentan un alto número de conexiones. El amplio espectro de comportamientos emergentes y transiciones de fase que exhibían las redes construidas según los modelos Watts-Strogatz y Barabási-Albert atrajo la atención de científicos de numerosos campos.

A ello siguió una cadena de descubrimientos que enfatizaron la relación entre la estructura compleja de dichas redes y todo tipo de fenómenos del mundo real. Por ejemplo, la conectividad característica de las redes de mundo pequeño demostró ser clave para entender la estructura de la World Wide Web o la comunicación entre las regiones anatómicas y funcionales del cerebro. Y poco después comenzaron a analizarse otras propiedades estructurales de las redes complejas, lo que ayudó a caracterizar y a entender la arquitectura de numerosos sistemas vivos y artificiales, desde las redes subcelulares hasta ecosistemas enteros o incluso Internet.

Hoy los investigadores se benefician de una potencia de cálculo sin precedentes, de la existencia de enormes cantidades de datos y de las nuevas técnicas de modelización computacional. Todo ello ha permitido tender puentes entre la dinámica individual de los nodos de una red y los comportamientos emergentes que esta exhibe a nivel macroscópico. Sin embargo, nuestro entendimiento de la topología de una red aún se basa en la inmediatez y simplicidad de los modelos de mundo pequeño y enlazamiento preferencial. No en vano, la relevancia de ambos modelos en distintos campos de la ciencia acabaría sentando las bases del campo multidisciplinar que hoy conocemos como teoría de redes.

Integrar conocimientos y métodos de áreas tan dispares como las ciencias sociales, la física, la biología, la informática y las matemáticas aplicadas no fue fácil. Se necesitaron varios años para encontrar un terreno común, acordar definiciones y valorar los diferentes enfoques que cada campo había adoptado para estudiar las redes. De hecho, semejante proceso continúa aun hoy, con todas las trampas y dificultades inherentes al trabajo interdisciplinar. Con todo, las últimas dos décadas han visto nacer una vibrante comunidad en torno a la ciencia de redes, con sus propias revistas especializadas, institutos de investigación y conferencias a las que asisten miles de científicos.

Veinte años después de su publicación, el modelo de Watts y Strogatz acumula miles de citas. Los autores concluían su artículo diciendo: «Esperamos que nuestro trabajo estimule más estudios sobre las redes de mundo pequeño». Pocas veces una afirmación se ha demostrado más profética.

Alessandro Vespignani *investiga en el Instituto de Ciencia de Redes y en el Laboratorio para la Modelización de Sistemas Biológicos y Sociotécnicos, ambos en la Universidad del Nordeste, en Boston.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 558, págs. 528-529, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Collective dynamics of «small-world» networks. Duncan J. Watts y Steven H. Strogatz en *Nature*, vol. 393, págs. 440-442, junio de 1998.

Emergence of scaling in random networks. Albert-László Barabási y Réka Albert en *Science*, vol. 286, págs. 509-512, octubre de 1999.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes sin escala. Albert-László Barabási y Eric Bonabeu en *IyC*, julio de 2003.





MATEMÁTICAS

El problema sin solución

Tras un viaje intelectual de varios años, tres matemáticos han demostrado que el problema del salto espectral, una cuestión clave en física, es imposible de resolver

Toby S. Cubitt, David Pérez-García y Michael Wolf

Toby S. Cubitt es investigador de la Real Sociedad británica y profesor de información cuántica en el Colegio Universitario de Londres. Tras un doctorado en física, varios posdoctorados en matemáticas y una plaza en ciencias de la computación, investiga en problemas cuánticos que combinan las tres disciplinas.

David Pérez-García es catedrático de matemáticas en la Universidad Complutense de Madrid y miembro del Instituto de Ciencias Matemáticas, en la misma ciudad. Su trabajo se centra en los aspectos matemáticos de la física cuántica.

Michael Wolf es catedrático de física matemática en la Universidad Técnica de Múnich. Investiga los fundamentos matemáticos y conceptuales de la teoría cuántica.



Estábamos los tres sentados en una cafetería de Seefeld, una pequeña ciudad de los Alpes austriacos. Corría el verano de 2012 y estábamos atascados. No en la cafetería: el sol brillaba, la nieve refulgía y los hermosos alrededores nos tentaban a abandonar el problema en el que estábamos inmersos. Investigábamos la relación entre la mecánica cuántica y los resultados matemáticos obtenidos en el siglo xx por Kurt Gödel y Alan Turing. Ese al menos era nuestro sueño. Uno que había comenzado en 2010, durante un programa de investigación en información cuántica celebrado en el Instituto Mittag-Leffler, cerca de Estocolmo.

Aunque algunas de las cuestiones que estábamos considerando ya habían sido estudiadas con anterioridad, para nosotros se trataba de una línea de investigación completamente nueva, por lo que habíamos decidido empezar con algo sencillo. En ese momento estábamos intentando demostrar un resultado no demasiado importante para hacernos una idea de cómo iban las cosas. Hacía meses que ya teníamos una prueba, pero, para que funcionara, había que formular el problema de una manera artificial y poco satisfactoria. Nos sentíamos como si estuviéramos cambiando la pregunta para adaptarla a la respuesta. Así que volvimos a retomar el problema durante la conferencia que nos había reunido en Seefeld. Entonces, medio en broma, uno de nosotros (Michael Wolf) preguntó: «¿Por qué no demostramos la indecidibilidad de algo que realmente le importe a la gente, como el problema del salto espectral?».

Por aquel entonces nos interesaba saber si ciertos problemas de la física eran decidibles o indecidibles; es decir, si pueden llegar a resolverse o no. Y nos habíamos atascado intentando demostrar la decidibilidad de una pregunta poco trascendente. Sin embargo, el problema del salto espectral (*spectral gap*) era uno de enorme importancia en física. Por aquel entonces no sabíamos si era decidible o no —aunque teníamos la corazonada de que no lo era— ni si seríamos capaces de demostrar una cosa o la otra. Pero, si lo lográbamos, los resultados serían de gran relevancia para la física, además de constituir un notable logro matemático. La ambiciosa sugerencia de Michael, hecha casi en broma, nos embarcó en una gran aventura. Tres años y 146 páginas de cálculos después, nuestra demostración de la indecidibilidad del problema del salto espectral se publicó en *Nature*.

Para entender qué significa todo esto, hemos de remontarnos al principio del siglo xx y examinar algunos de los elementos que dieron origen a la física, las matemáticas y la teoría de la computación modernas. Todas esas ideas dispares nos conducen hasta el matemático alemán David Hilbert, a menudo considerado como la figura más destacada de los últimos cien años en este campo.

EN SÍNTESIS

En los años treinta del siglo xx, Kurt Gödel demostró que existen proposiciones matemáticas bien formuladas cuya veracidad o falsedad es imposible de demostrar. Tales cuestiones se denominan «indecidibles».

Un trabajo reciente ha demostrado que un problema clave en física cuántica pertenece a esa categoría. Dicho problema es el del salto espectral: la cuestión de si la diferencia de energía entre el estado fundamental de un sistema y el primer estado excitado es cero o no.

La demostración combina elementos de matemáticas, mecánica cuántica y teoría de la computación. El resultado sugiere que otras preguntas clave en física también podrían ser imposibles de responder de manera general.

PÁGINAS ANTERIORES: MARK ROSS STUDIOS

LAS MATEMÁTICAS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

La influencia de Hilbert en las matemáticas fue inmensa. Al principio de su carrera desarrolló una rama llamada análisis funcional y, en particular, otra conocida como teoría espectral, la cual terminaría siendo clave en nuestra demostración. Hilbert estaba interesado en ella por razones puramente abstractas. Pero, como ocurre en tantas ocasiones, sus matemáticas resultaron ser justo lo que hacía falta para entender una pregunta que desconcertaba a los físicos de entonces.

Cuando calentamos una sustancia, esta comienza a brillar a medida que sus átomos emiten luz. El resplandor amarillo-anaranjado de las lámparas de sodio nos proporciona un buen ejemplo: los átomos de este elemento emiten luz con una longitud de onda de unos 590 nanómetros, en la parte amarilla del espectro visible. En general, los átomos absorben o liberan luz cuando sus electrones «saltan» entre niveles de energía, y la frecuencia de esa luz depende de la diferencia energética entre dichos niveles. Así que la frecuencia de la luz emitida por un material caliente nos permite trazar un «mapa» de sus niveles de energía atómicos. Explicar tales emisiones constituía uno de los grandes problemas físicos de la primera mitad del siglo XX. Ello condujo al desarrollo de la mecánica cuántica, donde la teoría espectral de Hilbert desempeñó un papel fundamental.

Uno de esos saltos entre niveles de energía reviste especial importancia. El nivel de energía más bajo de un material constituye su estado fundamental: aquel en el que se encuentra el sistema cuando carece de energía térmica. Para que un material se asiente en su estado fundamental, ha de enfriarse a temperaturas ultrabajas. Luego, si queremos que haga algo más, habremos de excitarlo hasta que alcance una energía superior. Lo más sencillo es que absorba la menor cantidad de energía posible, la suficiente para llevarlo al siguiente nivel energético por encima del fundamental; es decir, el primer estado excitado. La diferencia de energía entre el estado fundamental y ese primer estado excitado es tan importante que, a menudo, se denomina «salto espectral».

En algunos materiales existe una gran distancia entre el primer estado excitado y el estado fundamental. En otros, los niveles de energía llegan hasta el fundamental sin saltos de ningún tipo. Que un material posea o no un salto espectral tiene profundas consecuencias en su comportamiento a bajas temperaturas, y desempeña un papel clave en las transiciones de fase cuánticas.

Decimos que hay una transición de fase cuando un material experimenta un cambio súbito en sus propiedades. Algunos de estos procesos nos resultan muy familiares, como la transformación del hielo en agua líquida a cero grados Celsius. Sin embargo, hay transiciones de fase cuánticas más exóticas, que ocurren incluso cuando la temperatura se mantiene extremadamente baja. Por ejemplo, cambiar el campo magnético alrededor de un material o la presión a la que está sometido puede hacer que un aislante se convierta en superconductor o que un sólido se transforme en superfluido.

¿Cómo puede un material sufrir una transición de fase a una temperatura de cero absoluto (-273,15 grados Celsius), a la cual no hay ningún calor que proporcione energía? La respuesta tiene que ver con el salto espectral. En materiales que carecen de él, la energía necesaria para alcanzar un estado excitado se hace cero. Por tanto, una ínfima cantidad de energía bastará para hacer que el material experimente una transición de fase. De hecho, gracias a los extraños efectos cuánticos que dominan la física a bajas temperaturas, el material puede «tomar prestada» temporalmente dicha energía del vacío, experimentar una transición de fase y «devolver» después esa energía. Por tanto, para entender las fases cuánticas y las transiciones entre

MECÁNICA CUÁNTICA

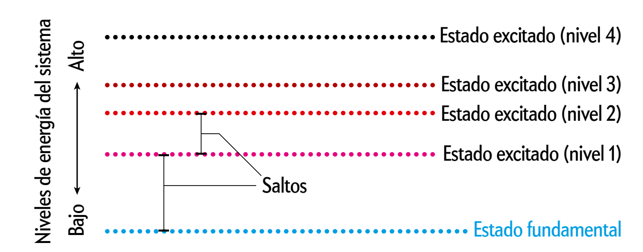
El salto espectral

Núcleo
Electrón
Energía
Estado fundamental
Estado excitado

El trabajo de los autores ha abordado el problema del «salto espectral»: la pregunta de si la diferencia de energía entre el estado fundamental de un sistema cuántico y el primer estado excitado es nula o mayor que cero. En un átomo, por ejemplo, los electrones pueden ocupar distintos niveles energéticos (*izquierda*). Aunque en tales casos la diferencia entre niveles de energía es siempre finita, en materiales formados por un gran número de átomos no tiene por qué ocurrir así (*abajo*). Los autores han demostrado que, en general, es imposible determinar si un material dado presentará un salto espectral o no.

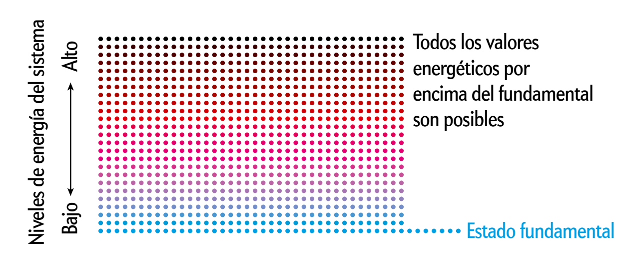
Sistema con salto espectral

Hay diferencias discretas entre cada nivel de energía. El material debe absorber una cierta energía mínima para abandonar el estado fundamental.

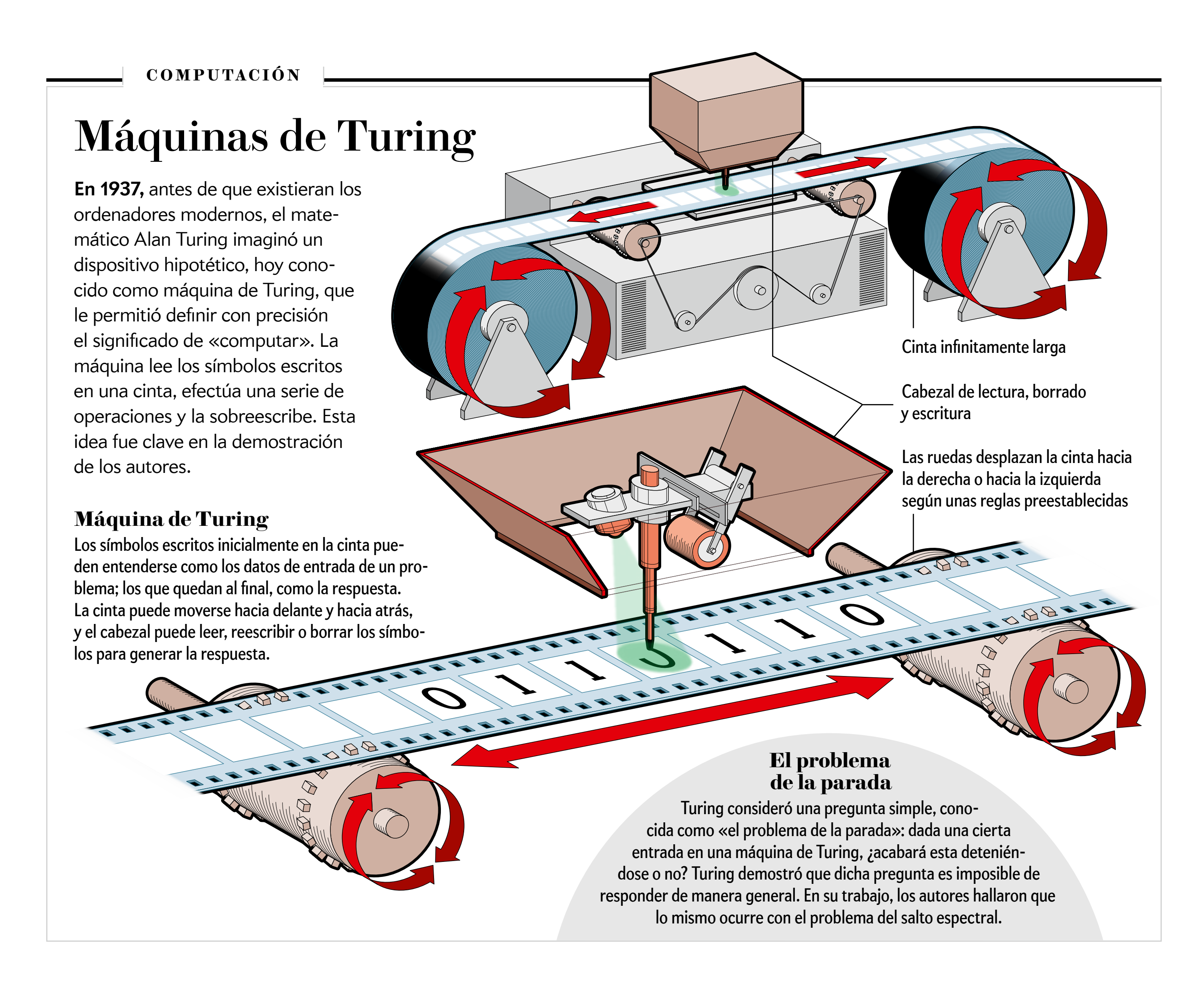


Sistema sin salto espectral

No existe ninguna separación entre el estado fundamental y el primer estado excitado. Incluso el mínimo aporte de energía es capaz de excitar el material y sacarlo del estado fundamental.



JEN CHRISTIANSEN



ellas, hemos de determinar bajo qué circunstancias un material presentará un salto espectral y cuándo no.

Muchos problemas famosos en física de la materia se reducen a resolver el problema del salto espectral para un material determinado. Incluso en física de partículas surge una pregunta estrechamente relacionada: hay indicios muy sólidos de que las ecuaciones fundamentales que describen las interacciones entre quarks implican un «salto de masa»: la existencia de una masa mínima (finita) para las partículas con masa que predice la teoría. Los datos obtenidos en los aceleradores de partículas apoyan esta idea, así como ingentes cálculos efectuados con superordenadores. No obstante, demostrarlo de un modo riguroso parece tremendamente difícil. Tanto que, de hecho, el Instituto Clay de Matemáticas ha incluido esta cuestión, conocida como «problema del salto de masa en Yang-Mills» (debido al nombre técnico que recibe la teoría de las interacciones entre quarks), entre uno de sus siete Problemas del Milenio, y recompensará a quien lo resuelva con un millón de dólares.

Todos estos problemas constituyen casos particulares de la cuestión sobre el salto espectral. Sin embargo, tenemos malas noticias para quien pretenda resolverlos. Nuestra demostración implica que el problema general es más complicado de lo que se pensaba. La razón se remonta a una cuestión planteada por Hilbert hace casi cien años y conocida con la voz alemana *Entscheidungsproblem*.

PREGUNTAS SIN RESPUESTA

En los años veinte del siglo pasado, Hilbert intentó sentar las bases de la matemática de manera rigurosa: un esfuerzo conocido como «programa de Hilbert». El alemán creía que debía ser posible demostrar la verdad o falsedad de cualquier proposición matemática. La idea tal vez parezca obvia, pero la esencia de las matemáticas consiste precisamente en establecer resultados con certeza absoluta. Por tanto, Hilbert quería una demostración rigurosa.

En 1928 formuló el *Entscheidungsproblem*. Aunque esta palabra pueda parecer la onomatopeya de un estornudo en alemán, en realidad se traduce como «el problema de la decisión», y pregunta si existe un procedimiento, o algoritmo, capaz de decidir si una afirmación matemática dada es verdadera o falsa.

Por ejemplo, a partir de la lógica y la aritmética básicas, es fácil demostrar que la afirmación «al multiplicar cualquier número entero por 2 se obtiene un número par» es verdadera. Pero otras afirmaciones no son tan claras. ¿Qué ocurre con el siguiente ejemplo?: «Si tomamos cualquier número entero, lo multiplicamos por 3 y sumamos 1 si es impar, lo dividimos entre 2 si es par, y repetimos este proceso una y otra vez, siempre acabaremos llegando al número 1». Piense en ello un momento.

Por desgracia para Hilbert, sus esperanzas se verían frustradas. En 1931, Gödel publicó varios resultados conocidos como «teoremas de incompletitud». Demostró que existían afirmacio-

BEN GILLILAND

nes sobre números enteros que, a pesar de ser perfectamente razonables, no podían probarse ni refutarse. En cierto sentido, tales afirmaciones quedan fuera del alcance de la lógica y de la aritmética. Si esto le parece extraño, no se preocupe: no es usted el único. Los teoremas de incompletitud de Gödel sacudieron los cimientos de las matemáticas.

Podemos acercarnos a la idea de Gödel con el siguiente ejemplo: si alguien nos espeta «esta frase es mentira», ¿dice la verdad o miente? Si está diciendo la verdad, entonces la afirmación ha de ser falsa. Pero, si está mintiendo, la frase ha de ser verdadera. Este dilema se conoce como paradoja del mentiroso. Aunque la oración parezca perfectamente razonable, no hay manera de determinar si es verdadera o falsa. El logro de Gödel consistió en construir una versión matemática rigurosa de la paradoja del mentiroso usando solo aritmética básica.

El siguiente personaje en nuestra historia es el matemático británico Alan Turing. Aunque para el gran público Turing tal vez sea más conocido por haber contribuido a descifrar los códigos secretos alemanes durante la Segunda Guerra Mundial, entre los científicos es célebre por un artículo publicado en 1937 y titulado «Sobre los números computables, con una aplicación al *Entscheidungsproblem*». Muy influido por el resultado de Gödel, el joven Turing había dado una respuesta negativa al *Entscheidungsproblem* de Hilbert: demostró que no podía haber un algoritmo general que decidiera si una afirmación matemática dada es verdadera o falsa. (El matemático estadounidense Alonzo Church llegó a la misma conclusión justo antes que Turing. Pero la prueba de Turing resultó ser de mayor calado y, en matemáticas, la demostración de un resultado es a menudo más importante que el resultado en sí.)

Para abordar el *Entscheidungsproblem*, Turing tuvo que definir con precisión qué significaba «computar» algo. Hoy entendemos las computadoras como dispositivos electrónicos que tenemos sobre el escritorio o que podemos portar de un sitio a otro. Pero los ordenadores tal y como los conocemos no existían en 1936. De hecho, el término *computador* designaba originalmente a una persona que efectuaba cálculos con lápiz y papel. No obstante, matemáticamente no hay ninguna diferencia entre calcular con lápiz y papel y hacerlo con un ordenador moderno (solo que el proceso es mucho más lento y propenso a errores).

Para ello, Turing propuso una computadora imaginaria, hoy conocida como máquina de Turing. Esa máquina ficticia no se parece a los ordenadores modernos, pero puede calcular lo mismo que el más potente de ellos. De hecho, cualquier cuestión que sea posible calcular —ya sea con computadoras cuánticas o con ordenadores del siglo XXI que aún no se han inventado— también podría calcularse con una máquina de Turing, solo que esta tardaría mucho más.

Una máquina de Turing consta de una cinta infinitamente larga y de un cabezal, el cual puede leer lo que hay en la cinta y escribir un símbolo en ella. Después, se mueve un paso a la derecha o a la izquierda y continúa el proceso. Los datos de entrada del cálculo se incluyen en los símbolos inicialmente escritos en la cinta, y los de salida son los que quedan impresos en ella cuando la máquina acaba el cómputo y se detiene. La invención de la máquina de Turing fue incluso más importante que la solución del *Entscheidungsproblem*. Al dar con una formulación matemáticamente rigurosa de lo que significaba calcular, Turing fundó el campo moderno de la ciencia de la computación.

Habiendo construido su modelo idealizado de una computadora, Turing demostró que había una pregunta muy sencilla acerca de tales máquinas que ningún procedimiento matemático podría decidir de manera general: dada una cierta entrada, ¿la máquina acabará deteniéndose o no? Esta pregunta se conoce como «el problema de la parada». En la época, su indecidibilidad causó una gran sorpresa. Pero hoy los matemáticos nos hemos acostumbrado a que cualquier cuestión en la que estemos trabajando puede ser demostrable, refutable... o indecidible.

NUESTRO PROBLEMA

En nuestro trabajo tuvimos que atar todos esos cabos (el problema cuántico del salto espectral, los aspectos computacionales de la indecidibilidad y la teoría espectral de Hilbert) para demostrar que, al igual que el problema de la parada, la pregunta del salto espectral era una de esas cuestiones indecidibles que Gödel y Turing nos descubrieron.

Conversando en aquella cafetería de Seefeld en 2012, tuvimos una idea sobre cómo demostrar un resultado matemático más débil relacionado con el salto espectral. Discutimos la idea, sin ni siquiera garabatear en una servilleta, y nos pareció que podía funcionar. Pero luego comenzó la siguiente sesión de charlas y ahí lo dejamos.

Unos meses más tarde, uno de nosotros (Toby Cubitt) visitó a Michael en Múnich e hicimos lo que no habíamos hecho en Seefeld: escribimos algunas ecuaciones en un papel y nos convencimos de que la idea funcionaba. Durante las semanas siguientes completamos el argumento y lo escribimos en una nota privada de cuatro páginas. (En matemáticas, nada está realmente demostrado hasta que uno no lo escribe o, mejor aún, hasta que lo escribe y se lo muestra a un colega para que lo examine.) Aquello supuso un gran avance. Hasta entonces, la idea de demostrar la indecidibilidad del problema del salto espectral era más una broma que un proyecto serio. Ahora teníamos los primeros indicios de que tal vez fuese posible. Sin embargo, aún nos quedaba un largo camino.

CAFÉ HASTA LA MADRUGADA

El siguiente paso consistió en vincular el problema del salto espectral con la computación cuántica. En 1985, Richard Feynman publicó uno de los artículos que impulsaron la idea de los ordenadores cuánticos. En él, explicaba cómo relacionar el estado fundamental de un sistema cuántico con la computación. Computar es un proceso dinámico: suministramos datos al ordenador y este efectúa una serie de pasos hasta dar con la respuesta. Sin embargo, el estado fundamental de un sistema cuántico es estático: no es más que su configuración cuando se halla a temperatura cero, en la que no hace nada. Entonces, ¿cómo pueden aprovecharse esos estados para calcular?

La respuesta guarda relación con una de las características definitorias de la mecánica cuántica: la superposición, o la capacidad de un sistema para encontrarse en varios estados a la vez (como el célebre gato de Schrödinger, vivo y muerto al mismo tiempo). Feynman propuso construir un estado cuántico que se encontrase en una superposición asociada a los distintos pasos de un cálculo: la entrada inicial, cada paso intermedio y el resultado. Más tarde, Alexei Kitaev, del Instituto de Tecnología de California, desarrolló esta noción ideando un material cuántico imaginario cuyo estado fundamental adoptaba exactamente esa forma.

Si usábamos la idea de Kitaev para «codificar» toda la historia de una máquina de Turing en el estado fundamental de un material, ¿podríamos transformar el problema de la parada

en el del salto espectral? En otras palabras, ¿podríamos demostrar que cualquier método que resolviese el problema del salto espectral resolvería también el problema de la parada? Dado que Turing había demostrado que este último era indecidible, eso probaría que el problema del salto espectral también lo era.

Codificar el problema de la parada en un estado cuántico no era una idea nueva. Seth Lloyd, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lo había propuesto casi dos décadas antes para demostrar la indecidibilidad de otra cuestión cuántica. Daniel Gottesman, del Instituto Perimeter de Física Teórica de Waterloo, y Sandy Irani, de la Universidad de California en Irvine, habían usado la idea de Kitaev para demostrar que incluso una simple fila de partículas cuánticas podía exhibir un comportamiento muy complejo. De hecho, era la versión de Gottesman e Irani la que esperábamos usar.

Sin embargo, el problema del salto espectral era completamente distinto, por lo que nos enfrentábamos a algunos obstáculos matemáticos de apariencia insuperable. El primero tenía que ver con la necesidad de suministrar los datos de entrada de la máquina de Turing. Recordemos que la indecidibilidad del problema de la parada se refiere a si la máquina se detendrá o no *dada una cierta entrada*. Pero ¿qué material cuántico imaginario nos permitiría elegir la entrada de la máquina de Turing y codificarla en el estado fundamental?

Nuestro problema anterior (aquel con el que estábamos atascados en Seefeld) nos había dado una idea: introducir un «giro» en las interacciones entre partículas, y usar ese ángulo de rotación para generar los datos de entrada de la máquina de Turing. En enero de 2013 nos encontramos en una conferencia en Pekín y discutimos esa posibilidad. Pero enseguida nos percatamos de que lo que teníamos que demostrar estaba muy cerca de contradecir algunos resultados conocidos sobre máquinas de Turing cuánticas. Así pues, antes de seguir, necesitábamos una demostración completa y rigurosa de que nuestra idea funcionaría.

Toby había formado parte del grupo de David Pérez-García en la Universidad Complutense de Madrid durante más de dos años. Ese mismo mes se trasladó a la Universidad de Cambridge, pero su nuevo apartamento aún no estaba listo, por lo que su amigo Ashley Montanaro, otro investigador en teoría de la información cuántica, se ofreció a alojarlo en su casa. Durante esos dos meses, Toby se puso a trabajar en una demostración rigurosa de la idea. Su amigo lo encontraba por las mañanas en la cocina, con una fila de tazas de café vacías a su lado después de haber trabajado toda la noche. Al final de esos dos meses, Toby envió la demostración completa.

EN BUSCA DE LA BALDOSA PERDIDA

Aquella demostración, de 29 páginas, nos enseñó cómo superar uno de los obstáculos para conectar el estado fundamental de un material cuántico con la computación con máquinas de Turing. Pero había un problema aún mayor: el material resultante nunca exhibía un salto espectral. Y, en ese caso, el problema era muy fácil de resolver: ¡nunca había salto!

No obstante, nuestra primera idea de Seefeld, que resultó ser mucho más débil de lo que deseábamos, nos sirvió para sortear el inconveniente. La clave estribaba en usar la teoría matemática de los teselados. Imagine que debemos recubrir con azulejos el suelo de un baño infinitamente grande. Las baldosas tienen dibujado un patrón muy simple: cada uno de sus cuatro lados es de un color diferente. Disponemos de varias cajas

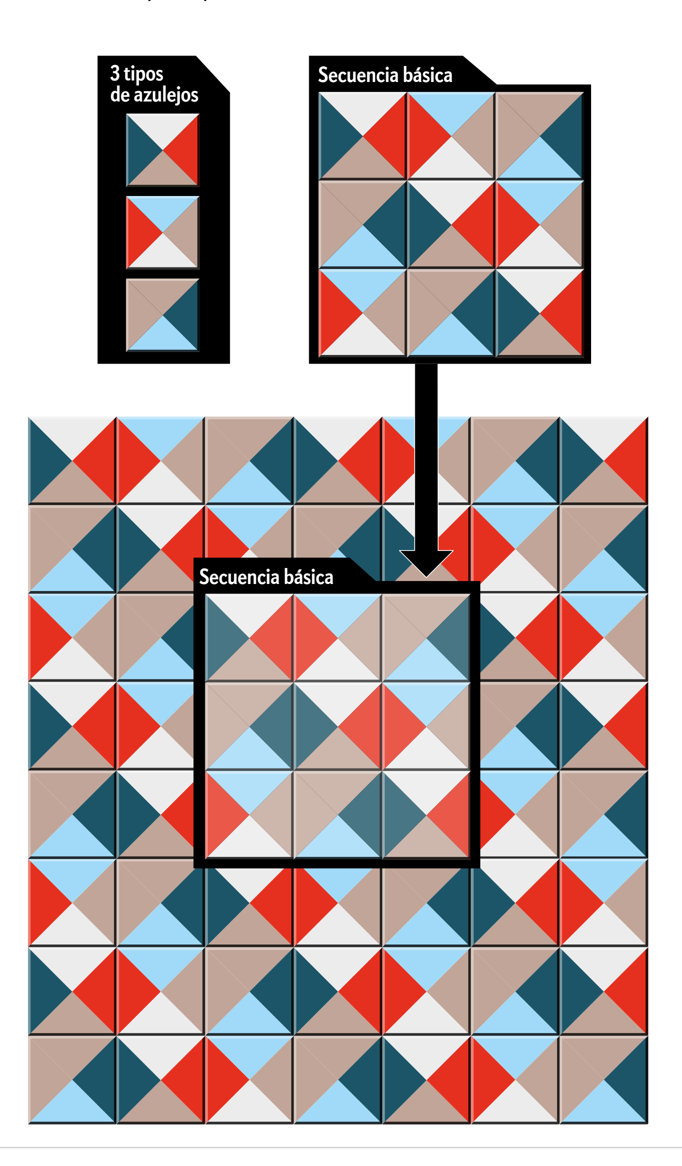
GEOMETRÍA

Embaldosar un suelo infinito

Para conectar el problema del salto espectral con el de la parada, los autores recurrieron a la teoría matemática de los teselados. Imagine que desea recubrir el suelo de un baño infinito y que para ello ha de usar distintos azulejos, de modo que, al disponerlos, dos lados contiguos sean siempre del mismo color. En algunos casos esto puede hacerse siguiendo un patrón periódico (*abajo*); en otros, ha de usarse uno aperiódico de tipo fractal (*página opuesta*).

Teselado periódico

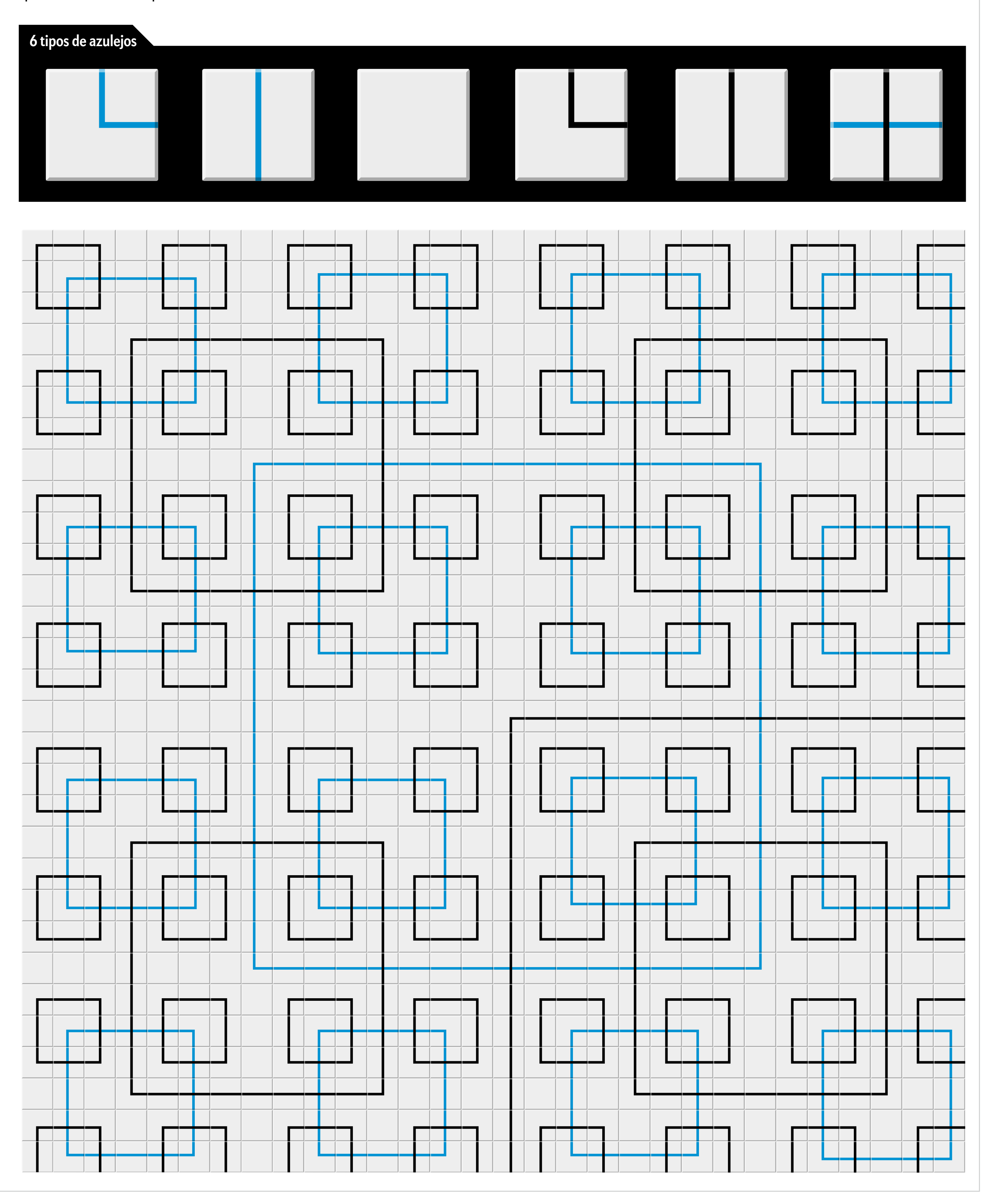
En una versión de este problema clásico, tenemos tres tipos de baldosas y cinco colores (*izquierda*). En tal caso es posible recubrir el suelo de forma que dos lados contiguos tengan siempre el mismo color generando primero un cuadrado cuyos lados opuestos tengan colores iguales (*derecha*). Después, bastará con colocar múltiples versiones de este cuadrado para recubrir el suelo con un patrón periódico (*abajo*).



JEN CHRISTIANSEN

Teselado aperiódico

En su demostración, los autores se basaron en un conjunto de baldosas concebido en 1971 por el matemático Raphael Robinson. Tales baldosas dan lugar a una secuencia cada vez mayor que no se repite en sentido estricto, sino que da lugar a un patrón fractal (*abajo*). Las seis baldosas mostradas aquí pueden también disponerse de forma periódica. Sin embargo, añadiendo más marcas (*no mostradas*), Robinsón encontró un conjunto de 56 baldosas para las cuales el único patrón posible es el fractal representado en este esquema.



de baldosas, cada una con una disposición de colores distinta. Ahora supongamos que en cada caja hay un número infinito de azulejos. Nos gustaría recubrir el suelo de nuestro baño infinito de modo que los colores de las baldosas adyacentes siempre coincidan. ¿Es posible?

La respuesta depende de las cajas de baldosas que tengamos a nuestra disposición. En algunos casos lo lograremos, pero en otros no. Antes de decidir qué cajas de baldosas vamos a comprar, nos gustaría saber si nos van a servir. Pero, por desgracia, en 1966 el matemático Robert Berger demostró que este problema también es indecidible.

Una manera fácil de embaldosar nuestro suelo infinito sería formar primero un pequeño rectángulo en el que los lados opuestos sean del mismo color. Ello nos permitiría recubrir todo el suelo sin más que repetir dicho patrón rectangular. Tales recubrimientos se denominan teselados periódicos. Lo que causa que el problema sea indecidible es que también existen teselados no periódicos: patrones que llenan un suelo infinito sin repetirse nunca.

Al principio, cuando estábamos discutiendo nuestro pequeño resultado inicial, estudiamos una simplificación de la demostración original de Berger presentada en 1971 por Raphael Robinson, de la Universidad de California en Berkeley. Robinson construyó un conjunto de 56 cajas de baldosas que, cuando se usaban para recubrir el suelo, producían un patrón de cuadrados cada vez mayores. Ese patrón fractal parece periódico, pero en realidad nunca se repite. Discutimos largo y tendido sobre las posibles maneras de usar esos resultados para demostrar la indecidibilidad de propiedades cuánticas. Por aquel entonces ni siquiera estábamos pensando en el problema del salto espectral, pero la idea permaneció latente.

En abril de 2013, Toby visitó a Charlie Bennett en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Entre los numerosos logros de Bennett antes de convertirse en uno de los padres de la teoría de la información cuántica, se encuentra su influyente trabajo de los años setenta sobre máquinas de Turing. Queríamos preguntarle acerca de algunos detalles de nuestra demostración para asegurarnos de que no estábamos pasando algo por alto. Nos dijo que llevaba cuarenta años sin pensar en esos temas y que ya iba siendo hora de que una generación más joven tomara el relevo. Luego, sin embargo, pasó a explicarnos algunas sutilezas de su trabajo que nos convencieron de que nuestra demostración era correcta.

Bennett posee una enorme cultura científica. Como habíamos estado hablando sobre máquinas de Turing e indecidibilidad, nos envió por correo electrónico un par de artículos antiguos que pensó que podrían interesarnos. Uno de ellos era el trabajo de Robinson de 1971 que ya habíamos estudiado. Entonces llegó el momento de cosechar las ideas que habíamos sembrado en nuestras discusiones anteriores. Al leer nuevamente aquel artículo sobre teselados no periódicos, nos dimos cuenta de que aquello era justo lo que necesitábamos para evitar que el salto espectral fuese siempre nulo.

Nuestra idea inicial consistía en codificar una copia de la máquina de Turing en el estado fundamental. Ajustando con cuidado las interacciones entre partículas, podíamos hacer que la energía de dicho estado variase un poco si la máquina de Turing se detenía. Así pues, el salto espectral (la diferencia de energía hasta el primer estado excitado) dependería de si la máquina de Turing se paraba o no. Solo había un problema: a medida que aumentaba el número de partículas, la contribución adicional a la energía del estado fundamental se acercaba cada vez más a cero, lo que nos llevaba de vuelta a un material sin salto espectral.

Sin embargo, adaptando el teselado de Berger, podíamos codificar muchas copias de la misma máquina de Turing en el estado fundamental. De hecho, podíamos asociar una copia a cada cuadrado del patrón de baldosas de Robinson. Dado que se trataba de copias idénticas de la misma máquina de Turing, si una de ellas se detenía, todas las demás lo harían también y las contribuciones energéticas de todas esas copias se sumarían. A medida que aumenta el número de partículas, crece el número de cuadrados en el patrón de baldosas. Por tanto, aumenta el número de copias de la máquina de Turing y su contribución energética se vuelve enorme, lo que permite la existencia de un salto espectral.

EXÁMENES Y PLAZOS

Aún quedaba un punto débil. No podíamos decir nada sobre cuán grande era la diferencia de energías cuando el material presentaba un salto espectral: este podía ser tan pequeño que, en la práctica, sería como si no existiese. Necesitábamos demostrar que el salto, cuando existía, era grande. La primera solución que encontramos surgió al considerar materiales en tres dimensiones, en lugar de los materiales planos que habíamos estudiado hasta entonces.

Cuando uno no puede dejar de pensar en un problema, los progresos aparecen en el lugar más insospechado. David trabajó mentalmente en los detalles de aquella idea mientras supervisaba un examen, paseando entre las mesas de los estudiantes que tan febrilmente trabajaban a su alrededor. Una vez concluido el examen, puso por escrito esa parte de la demostración.

Ahora sabíamos que era posible obtener un gran salto espectral. ¿Podíamos conseguirlo también en dos dimensiones, o eran necesarias tres? Recordemos el problema de embaldosar el suelo de un baño infinito. Lo que teníamos que demostrar era que, para el recubrimiento de Robinson, si uno se equivocaba de azulejo en algún lugar, el patrón solo se interrumpiría en una pequeña región centrada en la baldosa incorrecta. Si lográbamos garantizar esa «robustez» del teselado de Robinson, ello implicaría que no había manera de obtener un salto espectral pequeño alterando el teselado solo un poco.

A finales del verano de 2013 nos parecía que ya teníamos todos los ingredientes. Sin embargo, aún debíamos resolver algunos detalles, como asegurar que la robustez del teselado podía combinarse con el resto de la demostración. El Instituto Isaac Newton de Ciencias Matemáticas, en Cambridge, organizó un encuentro sobre información cuántica durante un semestre y los tres fuimos invitados a asistir. Era la oportunidad perfecta para concluir el proyecto. Sin embargo, David no podía quedarse mucho tiempo, por lo que decidimos completar la demostración antes de que se fuera.

El Instituto Isaac Newton tiene pizarras por todas partes, incluso en los baños. Para nuestras discusiones elegimos una de un pasillo (la más cercana a la máquina de café). Pasábamos allí largas horas desarrollando las ideas que faltaban y luego nos dividíamos la tarea de expresarlas de un modo riguroso. Ese proceso siempre requiere mucho más tiempo y esfuerzo de lo que parece en la pizarra. A medida que se acercaba la fecha

de partida de David, comenzamos a trabajar sin descanso durante el día y parte de la noche. Unas pocas horas antes de que tuviese que marchar, llegamos a la demostración completa.

En física y matemáticas, antes de enviar un trabajo a una revista científica, los investigadores casi siempre damos a conocer nuestros resultados publicando una versión preliminar en el repositorio en línea arxiv.org. Aunque estábamos bastante seguros de que todo funcionaba, nuestra demostración aún no estaba lista para ser publicada. Había que completar numerosos detalles, reescribirla y ordenarla un poco (esperábamos que eso nos permitiese reducir el número de páginas, pero ahí no tuvimos éxito). Y lo más importante: aunque al menos uno de nosotros había revisado cada parte de la demostración, nadie la había examinado de principio a fin.

Durante el verano de 2014, David estaba pasando un semestre sabático en la Universidad Técnica de Múnich, con Michael. Toby se unió a ellos. El plan era revisar toda la demostración y completar los detalles. David y Toby compartían despacho. Cada mañana, David llegaba con una nueva copia del borrador del artículo y abundantes notas garabateadas en los márgenes y en hojas intercaladas. Los tres íbamos a por café y continuábamos donde lo habíamos dejado el día anterior. Por la tarde dividíamos el trabajo de reescribir el artículo, añadir el material nuevo y revisar cuidadosamente el siguiente apartado de la demostración. Toby sufría una hernia discal y no podía sentarse, así que trabajaba con su ordenador portátil apoyado sobre un cubo de basura dado la vuelta encima de la mesa. David se sentaba enfrente, con una pila de notas que llenaba cada vez más el escritorio. En un par de ocasiones encontramos lagunas importantes. Aunque resultaron ser subsanables, llenar esos vacíos supuso añadir una cantidad notable de material. El número de páginas continuaba aumentando.

Después de seis semanas habíamos revisado, completado y mejorado cada línea de la demostración. Aún tardaríamos otros seis meses en terminar de escribirlo todo. Finalmente, en febrero de 2015, publicamos el artículo en el repositorio arxiv.org.

¿QUÉ SIGNIFICA TODO ESTO?

En última instancia, ¿qué nos dicen estas 146 páginas llenas de matemáticas?

Lo primero, y más importante, nos ofrecen una demostración rigurosa de que una de las preguntas básicas de la física cuántica no puede resolverse de manera general. Este detalle, «de manera general», es clave. Aunque el problema de la parada es indecidible para un caso genérico, muy a menudo sí podemos decir si una máquina de Turing acabará deteniéndose o no para una entrada concreta. Por ejemplo, si la primera instrucción del programa es «detente», la respuesta no deja lugar a dudas. Lo mismo ocurre si la primera instrucción hace que la máquina entre en un bucle infinito. Por tanto, aunque la indecidibilidad del problema del salto espectral implica que este no puede resolverse para todos los materiales, hay numerosos casos en los que sí tiene solución. La física de la materia condensada nos proporciona abundantes ejemplos al respecto. Sin embargo, nuestro resultado demuestra rigurosamente que una descripción completa de las interacciones microscópicas entre las partículas de un material no siempre basta para deducir sus propiedades macroscópicas.

Puede que se esté preguntando si nuestro hallazgo tiene alguna consecuencia para la física real. A fin de cuentas, dado un material concreto, siempre será posible responder a la pregunta de si presenta o no un salto espectral yendo al laboratorio y efectuando los experimentos correspondientes. Imaginemos que somos capaces de recrear en el laboratorio un trozo del material cuántico imaginario de nuestra demostración. Si lo lográsemos y tratásemos de medir su salto espectral mediante un experimento, el material no podría encogerse de hombros y responder «no puedo decírtelo, tu pregunta es indecidible». El experimento tendría que dar algún resultado.

La respuesta a esta aparente paradoja radica en que, estrictamente hablando, decir que un material presenta o no un salto espectral solo tiene sentido cuando el material es infinitamente grande. No hay duda de que los aproximadamente 10^{23} átomos que contiene incluso una pieza diminuta de material representan un número muy elevado. Para materiales normales, se acerca lo suficiente a infinito como para que no haya ninguna diferencia. Sin embargo, en el extraño material que ideamos para nuestra demostración, muy grande no equivale a infinito. Sería posible que, con 10^{23} átomos, pareciera no mostrar ningún salto espectral en los experimentos; pero que, tras añadir un solo átomo a la muestra, apareciese un salto espectral. Lo que implica nuestro resultado es que, en general, es imposible calcular el tamaño del material para el que ocurre dicha transición. Por ahora esta historia es hipotética, ya que no podemos producir un material tan complejo en el laboratorio. Sin embargo, gracias a una demostración matemática rigurosa, sabemos que hemos de tener especial cuidado a la hora de extrapolar los resultados experimentales de un material para inferir el comportamiento de otras muestras de mayor tamaño.

Volvamos ahora al problema del salto de masa en Yang-Mills: la pregunta de si las ecuaciones que describen las interacciones entre quarks implican o no un salto de masa. Las simulaciones por ordenador parecen indicar que la respuesta es afirmativa, pero nuestro resultado sugiere que demostrarlo con rigor puede ser harina de otro costal. ¿Podría ocurrir que los indicios de la existencia de un salto de masa desaparecieran al aumentar mínimamente el tamaño de la simulación? Nuestro resultado no puede responder a esta pregunta, pero abre la puerta a la intrigante posibilidad de que este problema y otras cuestiones importantes de la física sean indecidibles.

¿Y qué ocurrió con aquel resultado de poca monta que tratábamos de demostrar años antes en los Alpes austriacos? En realidad, aún seguimos trabajando en él. IyC

PARA SABER MÁS

Undecidability and nonperiodicity for tilings of the plane. Raphael M. Robinson en *Inventiones Mathematicae*, vol. 12, n.º 3, págs. 177-209; septiembre de 1971.

Undecidability of the spectral gap. Toby S. Cubitt, David Pérez-García y Michael M. Wolf en *Nature*, vol. 528, págs. 207-211, diciembre de 2015. La demostración completa se encuentra disponible en **arxiv.org/abs/1502.04573**

EN NUESTRO ARCHIVO

La ciencia después de Alan Turing. VV.AA. Número monográfico de la colección *Temas* de *IyC*, n.º 68, 2012.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

CLICS, MENTIRAS Y CINTAS DE VÍDEO

La inteligencia artificial permite que cualquiera manipule audios o vídeos. El mayor peligro es que eso nos lleve a no confiar absolutamente en nada

Brooke Borel

El pasado mes de abril circuló en Internet un nuevo vídeo de Barack Obama: con las banderas estadounidense y presidencial de fondo, parecía uno de sus muchos discursos previos. Obama, vestido con un traje negro y una pulcra camisa blanca, miraba a la cámara y, enfatizando sus palabras con las manos extendidas, exclamaba: «El presidente Trump es un completo imbécil».

Sin sonreír, proseguía: «Miren, yo nunca diría algo así. Al menos, no en una intervención pública. Pero hay alguien que sí lo haría». Entonces la pantalla se dividía y mostraba al actor Jordan Peele. Obama no había dicho nada: se trataba de una grabación real de una alocución de Obama mezclada con la imitación del cómico. Uno al lado del otro, el mensaje continuaba a medida que Peele, cual ventrílocuo digital, ponía más palabras en boca del expresidente.

EN SÍNTESIS

La rápida evolución de la inteligencia artificial (IA) permite crear vídeos y audios falsos. A algunos expertos les preocupa que la propagación de la desinformación a través de las redes sociales pueda tener un profundo impacto en el debate público y la estabilidad política.

Los científicos computacionales tratan de desarrollar herramientas basadas en la IA para detectar vídeos falsos, pero van un paso por detrás de los recursos para crear contenidos manipulados. Mientras, los científicos sociales advierten de que no basta con vigilar los bulos a posteriori.

Las noticias falsas escritas constituyeron un problema en las elecciones de 2016 en Estados Unidos. Las investigaciones indican que los vídeos falsos podrían ser especialmente efectivos para inspirar miedo, una emoción que impulsa el contenido viral. Preocupa que ello pueda socavar nuestra confianza en todos los medios, incluso los veraces.

TAYLOR CALLERY

En la era de las noticias falsas, el vídeo era un mensaje de interés público producido por BuzzFeed News para mostrar una aplicación de una nueva técnica de inteligencia artificial (IA) que permite hacer con los audios y vídeos lo mismo que Photoshop con las imágenes digitales: manipular la realidad.

Los resultados son aún bastante rudimentarios. Si se escucha y observa con atención, la voz de Obama suena un poco nasal. Durante unos instantes, su boca (fundida con la de Peele) parece flotar descentrada. Pero esta técnica, destinada a montadores de películas de Hollywood y diseñadores de videojuegos, evoluciona deprisa y ha despertado pensamientos sombríos en algunos expertos en seguridad nacional y en medios de comunicación. La próxima generación de algoritmos quizá permita crear bulos convincentes desde cero: no se alterarían grabaciones existentes, como en la alocución de Obama, sino que se orquestarían situaciones que jamás ocurrieron.

Esto podría tener profundas repercusiones en el debate y conocimiento públicos. Imaginemos, por ejemplo, el impacto que tendría en las próximas elecciones un vídeo falso que difamara a un político durante una campaña reñida. O que arremetiera contra el consejero delegado de una empresa la noche antes de una oferta pública. Algún grupo podría simular un ataque terrorista y engañar a los medios para que lo cubrieran, generando una reacción visceral. Y si luego se demuestra que un vídeo viral es falso, ¿seguirá la gente pensando, aun así, que era cierto? Y tal vez lo más perturbador: ¿y si la mera idea de la omnipresencia de bulos hace que dejemos de creernos mucho de lo que vemos y oímos, incluido lo que es real?

Muchos tecnólogos reconocen que el uso indebido de esta técnica podría generalizarse. Sin embargo, se obsesionan en buscar «soluciones atractivas para detectar y desvelar manipulaciones y dedican muy poco tiempo a averiguar si eso influye en lo que piensa la gente sobre la validez de los vídeos falsos», apunta Nate Persily, profesor de derecho en la Universidad Stanford. Persily estudia, entre otros temas, el impacto de Internet en la democracia y pertenece a un creciente grupo de investigadores que sostienen que no es posible frenar la desinformación viral solo con soluciones técnicas. Se requerirá la contribución de psicólogos, científicos sociales y expertos en medios de comunicación para descubrir cómo encajará esta tecnología en el mundo real.

«Tenemos que actuar ya», afirma Persily, «porque ahora mismo son los tecnólogos los que, inevitablemente, lideran el debate» sobre las posibilidades de los vídeos generados por IA. Nuestra confianza en los Gobiernos, el periodismo y otras instituciones democráticas ya está disminuyendo. Con las redes sociales como principal canal de distribución de la información, los creadores de noticias falsas lo tienen más fácil que nunca para aprovecharse de nosotros. Y sin una estrategia común para hacer frente a una tecnología cada vez más avanzada, el riesgo para nuestra frágil confianza colectiva es aún mayor.

COMIENZOS INOCUOS

El camino hacia los vídeos falsos se inició en la década de 1960, cuando se concibieron por primera vez las imágenes generadas por ordenador. En los años 80 se popularizaron los efectos especiales y, desde entonces, los amantes del cine han visto cómo la tecnología evolucionaba desde las películas de ciencia ficción al apretón de manos entre Forrest Gump y John F. Kennedy en 1994, culminando con la recreación de Peter Cushing y Carrie Fisher en *Rogue One: Una historia de Star Wars*. La meta siempre ha sido «construir un mundo digital donde pueda contarse cualquier historia», dice Hao Li, profesor adjunto de ciencias de la computación en la Universidad del Sur de California y director ejecutivo de Pinscreen, una empresa emergente de realidad aumentada. «¿Cómo podemos crear algo totalmente virtual que parezca real?»

Al principio, la mayoría de los gráficos provenían de artistas que usaban ordenadores para crear modelos tridimensionales y luego pintaban a mano las texturas y otros detalles, un proceso tedioso que no podía realizarse a gran escala. Hace unos veinte años, algunos investigadores que trabajaban en visión artificial empezaron a concebir los gráficos de forma distinta: en vez de invertir tiempo en modelos individuales, ¿por qué no enseñar a los ordenadores a generar imágenes a partir de datos? En 1997, científicos de la Interval Research Corporation, en Palo Alto, California, desarrollaron Video Rewrite, un programa capaz de recortar y reconfigurar grabaciones existentes. Los investigadores elaboraron un vídeo en el que John F. Kennedy decía: «Nunca conocí a Forrest Gump». Poco después, científicos del Instituto Max Planck de Cibernética Biológica, en Tubinga, enseñaron a un ordenador a extraer los rasgos de un conjunto de 200 escáneres tridimensionales de rostros humanos para componer una nueva cara.

El mayor avance reciente en la relación entre visión artificial, datos y automatización se produjo en 2012 con el desarrollo de un tipo de IA denominado aprendizaje profundo. A diferencia de los trabajos de finales del siglo xx, que empleaban datos estáticos y no progresaban, el aprendizaje profundo se adapta y mejora. Esta técnica reduce los objetos, como los rostros, a bits de datos, explica Xiaochang Li, investigadora postdoctoral del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia, en Berlín. «Ese es el momento en que los ingenieros dicen: ya no vamos a modelizar las cosas», añade, «sino nuestra ignorancia de ellas, usando los datos para entender los patrones».

El aprendizaje profundo utiliza las llamadas redes neuronales, capas de fórmulas matemáticas simples que desempeñan mejor una tarea conforme pasa el tiempo. Los científicos computacionales pueden, por ejemplo, enseñar a un algoritmo de aprendizaje profundo a reconocer rostros humanos proporcionándole cientos o miles de fotografías y, esencialmente, indicando para cada una «esto es una cara» o «esto no es una cara». Al final, cuando la aplicación vea una nueva persona, reconocerá los patrones que conforman las facciones humanas y concluirá, en términos estadísticos, «esto también es una cara».

Luego llegó la capacidad de inventar rostros que parecían de personas reales mediante técnicas de aprendizaje profundo conocidas como redes generativas. El procedimiento es el mismo: los científicos entrenan las redes con cientos o miles de imágenes. Sin embargo, en este caso la red usa los patrones que ha deducido de los ejemplos para componer un nuevo rostro. Algunas compañías ya emplean la misma estrategia con audios.

Brooke Borel es periodista y autora de *The Chicago guide to fact-checking*. Recientemente compitió contra un verificador de información basado en inteligencia artificial y ganó por un margen preocupante.







UNA TECNOLOGÍA originalmente desarrollada para crear escenas virtuales en películas (*1*) se ha convertido en un instrumento que puede emplearse para hacer vídeos falsos (*2*) y propagar bulos.

FOTOGRAMA DE *FORREST GUMP*, PARAMOUNT PICTURES, 1994 (*1*); FOTOGRAMA DE *YOU WON'T BELIEVE WHAT OBAMA SAYS IN THIS VIDEO!*, MONKEYPAW PRODUCTIONS Y BUZZFEED, 17 DE ABRIL DE 2018 (*2*)

A principios de este año, Google presentó Duplex, un asistente de IA basado en un programa llamado WaveNet que puede realizar llamadas telefónicas y hablar como una persona real, muletillas como «eh» y «ajá» incluidas. En el futuro, los vídeos falsos de políticos quizá ya no dependan de las imitaciones de actores como Peele. En abril de 2017, Lyrebird, una empresa emergente canadiense, hizo público un escalofriante audio con voces que sonaban igual que las de Obama, Trump y Hillary Clinton.

Sin embargo, para entrenar las redes generativas hacen falta grandes conjuntos de datos, lo cual puede requerir una importante cantidad de trabajo humano. El siguiente paso en la mejora de los contenidos virtuales consistió en enseñar a la IA a entrenarse a sí misma. En 2014, unos investigadores de la Universidad de Montreal lo consiguieron con una red generativa antagónica (GAN, por sus siglas en inglés), la cual pone en contacto dos redes neuronales. La primera, el «generador», crea imágenes falsas; la segunda, el «discriminador», aprende a distinguirlas de las reales. Sin apenas supervisión humana, las redes se entrenan compitiendo entre ellas: el discriminador empuja al generador a producir imágenes falsas cada vez más realistas, mientras que el generador no cesa de intentar engañar al discriminador. Las GAN pueden crear todo tipo de cosas: unos científicos de la Universidad de California en Berkeley construyeron una red que es capaz de convertir imágenes de caballos en cebras o pinturas impresionistas como las de Monet en nítidas escenas fotorrealistas.

El pasado mes de mayo, un grupo de investigadores del Instituto Max Planck de Informática, en Saarbrücken, y sus colegas presentaron un «vídeo profundo», realizado con un cierto tipo de GAN que permite a un actor controlar la boca, los ojos y los movimientos faciales de otra persona en imágenes grabadas con anterioridad. Por ahora, el vídeo profundo solo funciona cuando la persona mira directamente a la cámara. Si el actor se mueve demasiado, el resultado presenta imperfecciones digitales, como píxeles borrosos alrededor de la cara.

Las GAN aún no son capaces de crear vídeos complejos que no puedan distinguirse de las filmaciones reales. En ocasiones engendran rarezas, como personas con un globo ocular en la frente. Sin embargo, en febrero, investigadores de la compañía NVIDIA descubrieron un método que permite a las GAN generar rostros con una definición increíble: empezar el entrenamiento de la red con fotografías relativamente pequeñas e incrementar la resolución paso a paso. Y el equipo de Hao Li, en la Universidad del Sur de California, ha empleado GAN para generar piel, dientes y bocas realistas, elementos todos ellos muy difíciles de recrear digitalmente.

Ninguna de estas técnicas es fácil de usar para los profanos. Pero el experimento de BuzzFeed nos da una idea de cómo podría ser el futuro. El vídeo se realizó con el programa gratuito FakeApp, que emplea técnicas de aprendizaje profundo, aunque no GAN. Los vídeos resultantes se conocen como *deepfakes* (falsificaciones profundas), una mezcla de las expresiones *deep learning* (aprendizaje profundo) y *fake* (falsificación). El nombre se debe a un usuario del sitio web Reddit que fue de los primeros en adoptar esta técnica y usarla para sustituir las caras de actrices porno por rostros de famosas. Desde entonces, los aficionados han inundado la web de vídeos creados con FakeApp, en su mayoría bromas relativamente inofensivas, como añadir al actor Nicolas Cage en un montón de películas en las que no participó o transformar la cara de la canciller alemana Angela Merkel en la de Trump. Sin embargo, las implicaciones son más inquietantes. Ahora que la tecnología se encuentra al alcance de todos, en teoría cualquiera con un ordenador puede usarla.

CONDICIONES PARA LA DESINFORMACIÓN

A los expertos les preocupa desde hace tiempo que la edición por ordenador arruine la realidad. En el año 2000, un artículo de la revista *MIT Technology Review* sobre productos como Video Rewrite advertía de que «ver ya no es creer» y de que cualquier imagen en el telediario nocturno «podría ser un engaño, producto de la nueva y rápida tecnología de manipulación de vídeo». Dieciocho años después, no parece que los vídeos falsos estén inundando los informativos. Para empezar, conseguir un buen resultado sigue siendo difícil. BuzzFeed tardó *56* horas en

realizar el clip de Obama con la ayuda de un editor de vídeo profesional.

La forma en que consumimos la información, sin embargo, ha cambiado. En la actualidad, solo la mitad de los estadounidenses adultos ven las noticias en la televisión, mientras que dos terceras partes reciben al menos alguna información a través de las redes sociales, según el Centro de Investigación Pew. Internet ha permitido la proliferación de medios de comunicación dirigidos a una audiencia específica, incluidos los sitios web hiperpartidistas que, libres de las trabas impuestas por las normas periodísticas tradicionales, buscan deliberadamente generar indignación. Internet recompensa el contenido viral, que puede compartirse más rápido que nunca, comenta Persily. Y es más difícil percibir los problemas técnicos de un vídeo falso en una pequeña pantalla de móvil que en el televisor de la sala de estar.

La pregunta es qué ocurrirá si se vuelve viral una falsificación profunda con una gran repercusión social o política. Con unos límites tan nuevos e inexplorados, la respuesta corta es que no lo sabemos, comenta Julie Carpenter, investigadora del Grupo de Ética y Ciencias Emergentes de la Universidad Politécnica Estatal de California, en San Luis Obispo, que estudia las interacciones entre humanos y robots.

Ya hemos visto lo que ocurre cuando se juntan conectividad y desinformación: las noticias falsas (bulos diseñados para que parezcan noticias reales y se hagan virales) fueron un factor del que se habló mucho en las elecciones presidenciales de 2016 en Estados Unidos. Una colaboración entre la Universidad de Princeton, el Colegio Universitario Dartmouth y la Universidad de Exeter reveló que aproximadamente uno de cada cuatro estadounidenses visitó algún sitio de noticias falsas durante las cinco semanas comprendidas entre el 7 de octubre y el 14 de noviembre de 2016, sobre todo a través de enlaces en Facebook. Además, en 2016 la confianza de la sociedad en el periodismo alcanzó cotas mínimas: solo el 51 por ciento de los demócratas y el 14 por ciento de los republicanos afirmaban confiar en los medios de comunicación.

Aunque no hay muchos estudios sobre los bulos escritos, algunas investigaciones indican que basta con ver una información falsa una vez para que más adelante parezca verosímil, explica Gordon Pennycook, profesor adjunto de comportamiento organizacional en la Universidad de Regina, en Saskatchewan. El motivo no está claro, pero podría deberse a la «fluidez», explica, o «facilidad con que se procesa». Si oímos a Obama insultar a Trump y luego nos topamos con otro caso falso similar, tenderíamos a pensar que es real porque nos resulta familiar.

Según un estudio del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) que examinó 126.000 noticias publicadas en Twitter entre 2006 y 2017, compartimos con mayor frecuencia las informaciones falsas que las auténticas, y en especial las políticas, que se propagan más y más rápido que aquellas sobre economía, desastres naturales o terrorismo. El artículo sugiere que la gente ansía novedades. En general, los bulos juegan con nuestras emociones e identidad personal, incitándonos a reaccionar antes de tener la oportunidad de procesar la información y decidir si vale la pena difundirla. Cuanto más nos sorprende, asusta o indigna un contenido, más lo compartimos.

Hay indicios preocupantes de que los vídeos son especialmente efectivos para avivar el miedo. «Cuando procesamos una información visualmente, nos parece más cercana en términos de espacio, tiempo o grupo social», afirma Elinor Amit, profesora adjunta de ciencias psicológicas, lingüísticas y cognitivas en la Universidad Brown que estudia las diferencias en la manera en que nos identificamos con textos e imágenes. Amit sostiene que esta distinción es evolutiva: nuestro desarrollo visual precedió al lenguaje escrito y confiamos más en nuestros sentidos para detectar un peligro inminente.

De hecho, los vídeos falsos ya han azotado campañas políticas. En julio, Allie Beth Stuckey, presentadora de la cadena de televisión Conservative Review, publicó en Facebook una entrevista con Alexandria Ocasio-Cortez, candidata demócrata al Congreso por Nueva York. No se trataba de una falsificación profunda, sino de un empalme a la vieja usanza de una entrevista real con preguntas nuevas, para que diera la impresión de que Ocasio-Cortez confundía las respuestas. Dependiendo de la inclinación política, el vídeo se consideró una difamación o, como lo calificó Stuckey en su defensa, una sátira. En cualquier caso, en una semana recibió 3,4 millones de visitas y más de 5000 comentarios. Algunos espectadores creyeron que Ocasio-Cortez había errado el tiro en una entrevista real. «¡Por Dios! No sabe ni qué contestar», escribió uno. «Es estúpida.»

El que todo esto sea preocupante forma parte del problema. Y es que nuestras sombrías cavilaciones podrían perjudicar más a la sociedad que los propios vídeos. Por ejemplo, si aparecen grabaciones de políticos cometiendo fechorías reales, estos podrían alegar que se trata de falsificaciones y sembrar la duda. El mero hecho de saber que es posible crear bulos convincentes podría socavar nuestra confianza en todos los medios, asegura Raymond J. Pingree, profesor adjunto de comunicación de masas en la Universidad Estatal de Luisiana. Pingree estudia el grado de confianza de la gente en su capacidad para evaluar qué es real y qué no, y cómo afecta a su voluntad de participar en el proceso político. Cuando las personas pierden esa confianza, son más propensas a caer víctimas de mentirosos y estafadores, asegura, «y eso puede hacer que ya no quieran buscar la verdad».

«No ganaremos este juego. Pero conseguiremos que a los malos les resulte cada vez más complicado jugarlo.»

—Alexei Efros, *Universidad de California en Berkeley*

EL JUEGO DEL GATO Y EL RATÓN

Para un científico computacional, los fallos normalmente se solucionan con más ciencia computacional. Aunque los errores que nos ocupan son mucho más complejos que un código mal programado, en la comunidad existe la sensación de que es posible desarrollar algoritmos para detectar las falsificaciones.

«Ciertamente, podemos usar la tecnología para luchar contra el problema», comenta R. David Edelman, de la Iniciativa de Investigación de Políticas de Internet del MIT. A Edelman, que fue asesor técnico de Obama, le impresionaron los vídeos manipulados del expresidente. «Lo conozco y escribí discursos para él, pero no sabría distinguir el vídeo real del falso», admite.

Pero Edelman asegura que, aunque a él le puedan engañar, un algoritmo identificaría «tics y detalles digitales reveladores» que son invisibles para el ojo humano.

Por el momento, hay dos tipos de soluciones. Una opción es autentificar los vídeos con una firma digital, análoga a los intrincados sellos, hologramas y demás elementos que se emplean en la impresión de papel moneda para frustrar a los falsificadores. Así, cada cámara digital tendría una firma única que, en teoría, resultaría difícil de copiar.

La segunda estrategia consiste en emplear detectores para identificar automáticamente los vídeos manipulados. El esfuerzo más importante en esta dirección es un programa de la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa (DARPA) de EE.UU. llamado Media Forensics, o MediFor. Se puso en marcha en 2015, poco después de que un canal de noticias ruso emitiera falsas imágenes de satélite de un caza ucraniano disparando al vuelo 17 de Malaysia Airlines. Más tarde, un equipo de investigadores internacionales determinó que el avión fue abatido por un misil ruso. Las imágenes de satélite no se crearon con técnicas de aprendizaje profundo, pero la DARPA comprendió que se avecinaba una revolución y se propuso hallar una manera de combatirla, explica David Doermann, exdirector del programa.

MediFor adopta tres enfoques generales que pueden automatizarse con métodos de aprendizaje profundo. El primero examina la huella digital de un vídeo en busca de anomalías. El segundo comprueba que el vídeo obedece las leyes de la física (por ejemplo, que la luz del sol incide como lo haría en el mundo real). Y el tercero analiza datos externos, como el tiempo que hacía el día en que supuestamente se filmó. La DARPA planea unificar estos detectores en una única aplicación que cuantificaría la probabilidad de que un vídeo sea falso.

Estas estrategias reducirían el número de bulos, pero no dejaría de ser el juego del gato y el ratón, ya que los manipuladores empezarían a imitar las marcas de agua digitales o a construir herramientas de aprendizaje profundo para engañar a los detectores. «No ganaremos este juego», admite Alexei Efros, profesor de ciencias de la computación e ingeniería eléctrica en la Universidad de California en Berkeley, que colabora con el programa MediFor. «Pero conseguiremos que a los malos les resulte cada vez más complicado jugarlo.»

Y, en cualquier caso, pasarán años antes de que dispongamos de esas herramientas, señala Hany Farid, profesor de ciencias de la computación en el Colegio Universitario Dartmouth. Conforme van mejorando los vídeos falsos, la única solución técnica disponible es confiar en expertos forenses digitales como Farid. «En todo el mundo solo hay, literalmente, un puñado de personas con las que se puede hablar de este tema», indica. «Yo soy una de ellas. Y no puedo abarcar todo Internet.»

SALVAR LA REALIDAD

Aunque cada uno de nosotros pudiera utilizar detectores para analizar los contenidos de Internet, siempre existirá un desfase entre las mentiras y la verdad. Esa es una de las razones por las que detener la propagación de vídeos falsos supone un desafío para el sector de las redes sociales. «Se trata de un problema tanto de creación como de distribución», explica Edelman. «Si una falsificación profunda cae en el bosque, nadie lo oirá a menos que Twitter y Facebook lo amplifiquen.»

En lo que atañe a frenar la desinformación viral, no está claro qué obligaciones legales tienen las compañías de redes sociales o si puede regularse el sector sin pisotear la libertad de expresión. Tras las elecciones de 2016 en Estados Unidos, Mark Zuckerberg, director ejecutivo de Facebook, acabó reconociendo el papel que ha desempeñado su plataforma en la propagación de bulos, aunque le costó más de diez meses hacerlo. Después de todo, Facebook se diseñó para que los usuarios consumieran y difundieran contenidos, anteponiendo lo popular a lo veraz. Con más de 2000 millones de usuarios activos al mes, es un polvorín para cualquiera que pretenda encender la mecha con una noticia falsa que provoque indignación.

Desde entonces, Zuckerberg ha prometido actuar, aunque parte de la carga recae sobre los usuarios, a los que ha pedido que clasifiquen las fuentes de noticias según su credibilidad —lo que, para algunos, supone eludir su responsabilidad—. Además, la compañía planea usar la IA para detectar la desinformación, aunque no ha revelado los detalles y algunos científicos computacionales se muestran escépticos respecto a esta vía, incluido Farid, quien califica las promesas de «espectacularmente ingenuas». Pocos científicos independientes han podido estudiar cómo se propagan los bulos en Facebook, porque el acceso a muchos de los datos relevantes ha estado restringido.

Aun así, todos los algoritmos y datos del mundo no nos salvarán de las campañas de desinformación mientras los investigadores que desarrollan las tecnologías con que se crean los vídeos falsos no aborden la forma en que la gente usará y abusará de sus productos cuando salgan del laboratorio. «Esa es mi petición», concluye Persily. «Que esos científicos se alíen con los psicólogos y expertos en comunicación y ciencias políticas que ya llevan tiempo trabajando en este tema.»

Ese tipo de colaboración rara vez se produce. No obstante, en marzo, el Centro Finlandés de Inteligencia Artificial anunció un programa que invitará a psicólogos, filósofos y especialistas en ética, entre otros, para que ayuden a los investigadores de IA a comprender las implicaciones sociales de su trabajo. Y en abril, Persily y Gary King, experto en ciencias políticas de la Universidad Harvard, pusieron en marcha la Iniciativa de Datos Sociales. El proyecto permitirá a los científicos sociales acceder por primera vez a los datos de Facebook para estudiar la propagación de la desinformación.

Dado el vacío de responsabilidad en las altas esferas, son los periodistas y detectives ciudadanos los que han tenido que asumir la tarea de eliminar los vídeos falsos. Cerca del final del clip manipulado de Obama y Peele, ambos hombres declaran: «De cara al futuro, debemos tener más cuidado a la hora de confiar en algo en Internet. Es un momento en que necesitamos fuentes de información fiables». Puede que el vídeo fuera falso, pero esto último es cierto. IyC

PARA SABER MÁS

The science of fake news. David M. J. Lazer et al. en *Science*, vol. 359, págs. 1094-1096, marzo de 2018.
Why do people share fake news? A sociotechnical model of media effects. Alice E. Marwick en *Georgetown Law Technology Review*, vol. 2, n.º 2, págs. 474-512, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aprendizaje profundo. Joshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.
La era de la (des)información. Walter Quattrociocchi en *IyC*, octubre de 2016.
No creas lo que ven tus ojos. Lawrence Greenemeier en *IyC*, abril de 2018.


NO
NO



UNA MIRADA AUTOCRÍTICA

Sea o no cierto que se esté fraguando una verdadera «guerra contra la ciencia», un millón de defensores del conocimiento basado en pruebas fehacientes se sintieron lo bastante amenazados como para participar en la Marcha por la Ciencia celebrada en 2017 en todo el mundo. El presidente Donald Trump ha calificado el calentamiento global de farsa y su Gobierno ha cancelado, paralizado y desprovisto de financiación las labores científicas destinadas a salvaguardar el ambiente y la salud pública. Además, la negación del cambio climático no se limita a EE.UU., y decenas de países han prohibido el cultivo de organismos modificados genéticamente pese a demostrarse que esas variedades son tan inocuas como las cultivadas de forma tradicional.

Existen numerosas formas de contraatacar, como la mejora de la educación, la divulgación y una reforma política. Pero la ciencia debe afrontar también sus propios retos, como una financiación apropiada, la promoción de los científicos jóvenes, la obtención de unos resultados reproducibles o el fomento de la interdisciplinariedad. Algunas soluciones creativas se vislumbran prometedoras en esos frentes, pero la propia ciencia debe fortalecerse para resistir el ataque actual.

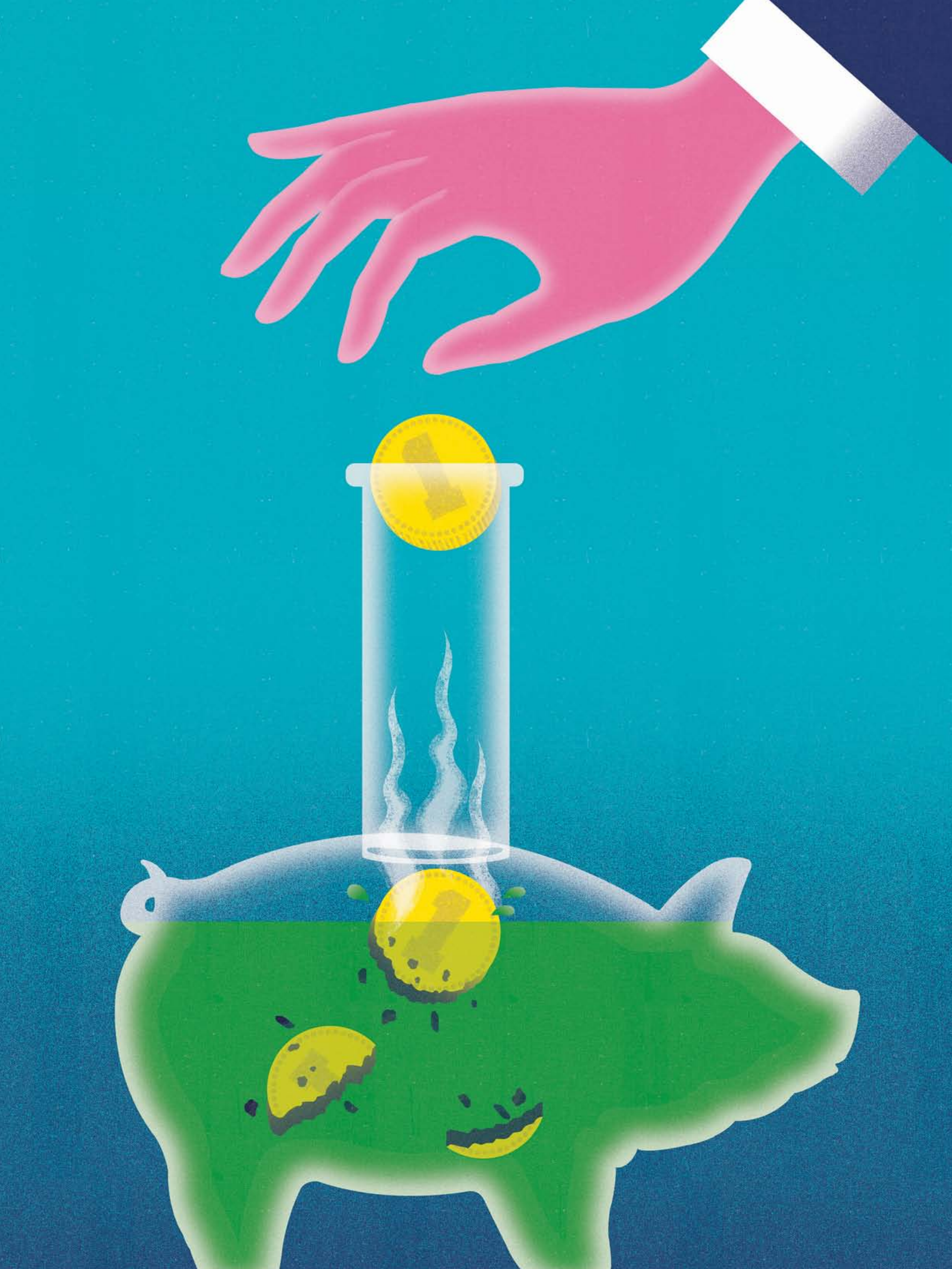
EN SÍNTESIS

Para poder eludir las corrientes anticientíficas, los investigadores deben fortalecer su labor desde dentro.

La ineficiente financiación de la investigación conlleva a menudo malos resultados. Demasiados estudios se desbaratan al someterlos a examen o no superan las pruebas de reproducibilidad.

Otro punto débil es la falta de interdisciplinariedad. Y demasiados investigadores trabajan aislados de expertos de otras disciplinas con intereses comunes.

ILUSTRACIÓN DE NEIL WEBB



John P. A. Ioannidis es profesor de medicina, investigación y política sanitaria, ciencia de datos biomédicos y estadística en Stanford. Es codirector del Centro de Innovación en Metainvestigación de Stanford (METRICS).



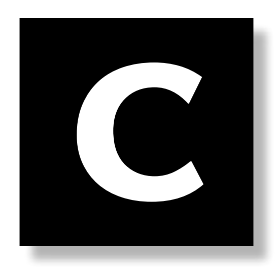


REPLANTEAR LA FINANCIACIÓN

La manera actual de invertir en ciencia no incentiva los mejores resultados

John P. A. Ioannidis

ILUSTRACIÓN DE NEIL WEBB



ON MILLONES DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS publicados cada año y una inversión global en I+D de unos dos billones de dólares anuales, la investigación progresa de forma notable. Pero ¿podemos hacerlo mejor? Cada vez existen más indicios de que algunos de los métodos que usamos para realizar, evaluar, comunicar y difundir la investigación son terriblemente ineficientes. En 2014, una serie de artículos publicados en *The Lancet* estimaba que el 85 por ciento de la inversión en biomedicina acaba malgastándose. Otras disciplinas sufren inconvenientes similares. A continuación se describen algunos problemas y sus posibles soluciones.

Financiamos a muy pocos científicos

La mayoría del dinero recae en pocas manos. Existe un gran número de científicos con talento cuyo éxito depende en buena parte de la suerte. Quienes hoy gozan de una jugosa financiación no son necesariamente grandes astros de la ciencia; puede que simplemente cuenten con mejores contactos.

Soluciones:

— Decidir por sorteo qué propuestas financiar (tal vez tras una fase previa de revisión básica). Ello eliminaría el esfuerzo y el gasto que hoy exige la evaluación de proyectos y daría oportunidades a muchos más investigadores.

— Una propuesta que pretendía limitar la financiación que podría recibir un solo investigador fue salvajemente derribada por las prestigiosas instituciones que más provecho sacan de esta excesiva concentración de fondos. Sin embargo, derivar dinero de los científicos veteranos hacia otros más jóvenes, incluso en un mismo laboratorio, no afectaría a esas instituciones y fomentaría la innovación.

No recompensamos la transparencia

Numerosos protocolos, métodos, procesos de cálculo y conjuntos de datos son opacos. Cuando tratamos de abrir esas cajas negras, a menudo hallamos que no podemos reproducir muchos hallazgos relevantes. Así ocurre con dos de cada tres artículos destacados de psicología, uno de cada tres de economía experimental y más del 75 por ciento de los que identifican dianas terapéuticas contra el cáncer. Y peor aún: no se premia a quienes sí comparten sus técnicas. Esta buena práctica exige un gran esfuerzo. En un ambiente competitivo, muchos piensan: ¿para qué dar munición a otros? ¿Por qué compartir?

Soluciones:

— Crear infraestructuras que faciliten la transparencia y la apertura.

— Exigir la transparencia como requisito para la financiación.

— Los centros de investigación podrían contratar o ascender preferentemente a quienes destacan por su transparencia.

No incentivamos la replicación

Ante la presión por publicar nuevos hallazgos, hay pocos incentivos a favor y muchos en contra a la hora de replicar estudios. Sin embargo, la replicación es una pieza clave del método científico. Sin ella, corremos el riesgo de inundar la bibliografía con información falsa que nunca se corrige.

Soluciones:

— Las agencias deberían destinar fondos a estudios de replicación.

— El ascenso de un científico no debería basarse solo en sus descubrimientos, sino también en su historial de replicaciones.

No financiamos a investigadores jóvenes

La edad media de un experto en biomedicina que recibe su primera subvención sustancial se sitúa en 46 años, una cifra que aumenta con el tiempo. La media de edad de los profesores titulares en EE.UU. es de 55 años, y también sigue incrementándose. En 2017, solo el 1,6 por ciento del programa de becas de los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) de EE.UU. fue para investigadores principales de menos de 35 años, mientras que el 13,2 se concedió a científicos de 66 años o más. Algo parecido ocurre en otras disciplinas. Ello no se explica por el mero aumento en la esperanza de vida. Heisenberg, Einstein, Dirac y Pauli consiguieron sus mayores logros cuando rondaban los 25 años. ¿Qué habría ocurrido si hubieran tenido que aguardar otros 25 para obtener financiación? Algunos de nuestros mejores cerebros preferirían abandonar en lugar de esperar.

Soluciones:

— Destinar un porcentaje mayor a la financiación de investigadores jóvenes.

— Las universidades deberían modificar la distribución de edad de su cuerpo docente contratando a científicos jóvenes.

Usamos fuentes de financiación sesgadas

La mayor parte de la financiación destinada a I+D en EE.UU. no procede del Gobierno, sino de fuentes privadas con ánimo de lucro, lo que genera inevitables conflictos de interés. Los ensayos clínicos financiados por la industria farmacéutica tienen un 27 por ciento más de probabilidades de arrojar resultados positivos que los sufragados con dinero público. Philip Morris, el fabricante de los cigarrillos Marlboro, anunció hace poco que contribuiría con 960 millones de dólares durante 12 años a la creación de la Fundación

por un Mundo sin Humo, una iniciativa sin ánimo de lucro que intentará erradicar el tabaquismo. Son numerosas las disciplinas que han mejorado la manera de informar sobre conflictos de interés, pero aún estamos lejos de una solución.

Soluciones:

— Restringir e incluso prohibir la financiación de proyectos con claros conflictos de interés. Las revistas especializadas no deberían aceptar investigaciones con ese tipo de controversias.

— Los conflictos menos evidentes deberían al menos garantizar una transparencia total.

Financiamos disciplinas equivocadas

Como clanes mafiosos, algunas líneas de investigación han gozado tradicionalmente de más poder que otras. Dado que las áreas mejor financiadas atraen a más científicos, el alcance de sus grupos de presión es también mayor, lo que genera un círculo vicioso. Algunos campos muy arraigados acaparan gran parte del dinero aun habiendo demostrado un rendimiento limitado o fallos incorregibles.

Soluciones:

— Los resultados de las disciplinas con mayor financiación deberían someterse a una evaluación independiente.

— Debería destinarse más dinero a nuevos campos de estudio y a líneas más arriesgadas.

— Hoy se incentiva a los investigadores para que se centren en una sola área. En su lugar, debería fomentarse el salto entre disciplinas.

No gastamos lo suficiente

En muchos países, la financiación pública se ha paralizado y se ve mermada por otras partidas presupuestarias. El gasto militar en EE.UU. (886.000 millones de dólares) es 24 veces mayor que el de los NIH (37.000 millones de dólares). Y el valor de un equipo de fútbol como el Manchester United (3100 millones de libras) supera al presupuesto anual de investigación de cualquier universidad. Invertir en ciencia beneficia a la sociedad en su conjunto. Pero, a menudo, los intentos de convencer al público resultan contraproducentes cuando los investigadores prometen lo imposible, como la inminente erradicación del cáncer o del alzhéimer. El incumplimiento de esas promesas puede minar el apoyo a la ciencia.

Soluciones:

— Debemos explicar mejor cómo usamos la financiación; aclarando, por ejemplo, el número de investigadores que hacen falta para lograr avances sustanciales. Las universidades, los museos y el periodismo científico pueden ayudar a transmitir ese mensaje.

— La defensa de la ciencia resultaría más convincente si pudiéramos demostrar que, en efecto, estamos poniendo todo nuestro empeño en mejorar las cosas.

Recompensamos a los derrochadores

Muchas contrataciones y ascensos se otorgan a investigadores con capacidad para atraer fondos. Sin embargo, la relevancia de un proyecto no se correlaciona necesariamente con su coste. Esta práctica solo fomenta la selección de buenos gestores que saben cómo conseguir dinero.

Soluciones:

— Debería recompensarse a los científicos por la calidad, la reproducibilidad y el valor social de su trabajo, no por su capacidad para atraer financiación.

— Muchas investigaciones excelentes pueden lograrse con poco dinero: solo necesitan que se les garantice tiempo. Las instituciones deberían proporcionar ese tiempo y respetar a quienes pueden hacer un buen trabajo sin gastar enormes sumas de dinero.

No financiamos ideas arriesgadas

Los comités de evaluación, aun aquellos formados por científicos excelentes, tienden a rechazar las ideas arriesgadas. La presión por «gastar bien» el dinero del contribuyente conduce a apoyar los proyectos con mayores probabilidades de dar resultados positivos, por más que otros más arriesgados puedan lograr avances más relevantes. La industria también evita invertir en proyectos de alto riesgo, y espera a que sean las empresas emergentes las que experimenten —y a menudo fracasen— con ideas no convencionales. Como resultado, nueve de las diez mayores farmacéuticas invierten más en mercadotecnia que en I+D. Las agencias públicas aseguran abrazar la «innovación». Eso no tiene sentido: la innovación es extremadamente difícil de predecir, por no decir imposible. Cualquier idea que sobreviva al examen de 20 expertos tiene muy pocas posibilidades de ser rompedora. Para ser aceptada por todos ha de ser estándar, si no totalmente mediocre.

Soluciones:

— Financiar científicos excelentes en lugar de proyectos y concederles libertad para investigar. Algunos centros, como el Instituto Médico Howard Hughes, en Maryland, ya aplican con éxito este modelo.

— Comunicar al público y a los políticos que la ciencia implica una inversión acumulativa. De 1000 proyectos, 999 podrían no funcionar, y nunca podremos saber de antemano cuál lo hará. El éxito ha de medirse sobre el conjunto, no sobre experimentos o resultados aislados.

Carecemos de buenos datos

Existen pocas pruebas de cuáles son las prácticas científicas que mejor funcionan. Hace falta investigar más la propia investigación («metainvestigación») para dar con el mejor modo de realizar, evaluar, revisar, difundir y recompensar la ciencia.

Solución:

— Habría que invertir en estudios metacientíficos. Nadie debería confiar en ninguna opinión —incluida la mía— que no esté respaldada por pruebas.

PARA SABER MÁS

Assessing scientists for hiring, promotion, and tenure. David Moher et al. en *PLOS Biology*, vol. 16, n.º 3, art. n.º e2004089; 29 de marzo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Quién financiará la próxima gran idea? David J. Kappos en *IyC*, diciembre de 2013.
¿Quién debe financiar la investigación básica? Nathan Myhrvold en *IyC*, marzo de 2016.



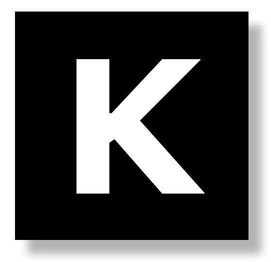
HACER REPRODUCIBLE LA INVESTIGACIÓN

Una mejora en los incentivos podría reducir el alarmante número de estudios que, al repetirlos, se demuestran erróneos

Por Shannon Palus

ILUSTRACIÓN DE NEIL WEBB





atie Corker se preguntaba a qué temperatura tendría que estar el café. Se había propuesto llevar a cabo un experimento de psicología, o, mejor dicho, replicar uno. Un trabajo publicado en 2008 en la prestigiosa revista *Science* y que fue acompañado por un gran eco mediático afirmaba que sostener un objeto caliente podía hacer que una persona se comportase de forma más cordial con otros. Sin embargo, cuando Corker trató de repetir cada paso del estudio, se halló ante numerosas incógnitas: la temperatura del café entregado a los participantes, la velocidad a la que se enfriaba la taza en sus manos...

Corker, psicóloga de la Universidad Estatal de Grand Valley, en Michigan, perseguía algo que muy pocos científicos intentan: reproducir cuidadosamente un experimento previo y publicar los resultados. Su objetivo era comprobar si, en otro laboratorio y con un grupo distinto de sujetos, observaría el mismo efecto que el descrito en el estudio original, el cual había sido efectuado por un único equipo de investigación y con solo 94 participantes. En teoría, así debería funcionar la ciencia: un proceso que se autocorrige y en el que unos investigadores aprovechan los resultados de otros.

Durante décadas, ha sido casi un secreto a voces que, en algunas disciplinas, buena parte de la bibliografía era, sencillamente, errónea. En biomedicina la verdad salió a la luz en 2012. Glenn Begly era vicepresidente y director global de hematología y oncología de la farmacéutica Amgen, donde supervisaba el desarrollo de fármacos contra el cáncer basándose, en parte, en los esperanzadores avances de la academia. Tras diez años de dedicación, quiso saber por qué se suspendían algunos proyectos con prometedores objetivos farmacológicos. Al revisar los informes de la compañía, descubrió con asombro que a menudo el problema radicaba en la investigación preclínica, estudios que sus equipos de trabajo verificaban antes de invertir dinero y recursos. «Para mi horror, descubrí que, en el 90 por ciento de los casos, éramos incapaces de reproducir lo que estaba publicado», explica Begley, hoy director general de la australiana BioCurate. Más adelante, un análisis reveló que los intentos fallidos de replicar el trabajo preclínico en biomedicina costaban 28.000 millones de dólares al año solo en Estados Unidos. Begley incluso envió a científicos de Amgen a algunos laboratorios para observar cómo los investigadores intentaban reproducir sus propios resultados. Tampoco lo consiguieron.

Mientras tanto, la crisis se iba haciendo patente en psicología. Casi 300 científicos invirtieron su tiempo en repetir los experimentos recogidos en cien artículos como parte de un proyecto sobre reproducibilidad emprendido por Brian Nosek, psicólogo de la Universidad de Virginia. En 2015 concluyeron que solo el 36 por ciento de las replicaciones mostraban resultados significativos coherentes con los hallazgos originales.

Aunque los grandes estudios de reproducibilidad se han centrado en biomedicina y psicología, el problema no se limita a esas disciplinas. Lorena A. Barba, ingeniera de la Universidad George Washington y experta en dinámica de fluidos computacional, pasó tres años trabajando con un estudiante para reconstruir una compleja simulación de su propio laboratorio sobre la manera en que planean las serpientes voladoras. Sus resultados se demostraron compatibles con los originales, pero Barba descubrió que examinar un código ajeno para reconstruir lo que habían hecho otros podía convertirse en una pesadilla. Básicamente, se enfrentó al mismo problema que Corker con las tazas de café: la atención de los científicos está puesta en la publicación de resultados, no necesariamente en cada paso que dan para obtenerlos. Aun así, Corker tuvo suerte. El autor original del estudio sobre el café se mostró plenamente dispuesto a colaborar con ellos. También trabajó con un químico para estandarizar a qué velocidad cambiaba la temperatura del dispositivo experimental. «Me pareció más difícil que algunas de mis propias investigaciones», asegura.

Algunos hábitos científicos arraigados, como la aversión a compartir técnicas por miedo al robo de una primicia, suelen jugar en contra de la reproducibilidad. El propio campo de estudio de Barba se gestó en un velo de secretismo en Los Álamos, durante el Proyecto Manhattan, cuando los investigadores que diseñaban las primeras armas nucleares comenzaron a usar ordenadores para calcular cuánto amplificaban la explosión las ráfagas de aire. Sin duda, el Proyecto Manhattan impulsó buena parte de las ciencias duras, pero en aquella época los científicos trataban de impedir que otros pudieran replicar su trabajo.

Por otro lado, tanto las revistas científicas como los comités de evaluación premian a menudo resultados nuevos e impactantes en lugar de progresos graduales obtenidos con cuidado a partir de la bibliografía existente. «Me formaron con el objetivo de descubrir efectos inesperados», señala Charlotte Tate, psicóloga social y de la personalidad de la Universidad de San Francisco. Pero esa actitud no es una mera cuestión de vanidad: los resultados impactantes son a menudo la forma de conseguir un puesto de trabajo. Quienes verifican con paciencia la labor de terceros o invierten horas de más para asegurarse de que su código será fácil de entender por otros no aparecerán en los titulares, ni sus currículums serán los primeros del montón.

Hoy, muchos recalcan las ventajas de una mejor formación (aprender a redactar sin fisuras la sección de métodos de un artículo científico, documentar bien un código para que sea legible por otros) para superar la crisis. Barba es una de esas voces. Apunta que quienes trabajan con código harían bien en aprender a acompañar sus resultados con un programa bien documentado. La investigadora también usa una tecnología llamada «control de versiones», la cual registra cualquier cambio introducido en un archivo informático para que sea fácil seguir su evolución. Se trata de una herramienta habitual en el



desarrollo de programas, pero, para el asombro de Barba, aún no en el ámbito científico. «Existe una gran brecha entre la realización de un experimento y su documentación», atestigua Charles Fracchia, cuya empresa, BioBright, intenta aumentar el grado de detalle y profundidad de las bitácoras de trabajo en biomedicina. Una de sus herramientas, DarwinSync, registra los datos de todos los instrumentos, incluidos detalles en apariencia irrelevantes (como la cantidad de luz en la sala o si un ordenador estaba enchufado o funcionaba con baterías), por si pudieran tener alguna relevancia posterior. En el intento de replicación de Corker, una mejor especificación de la temperatura de las tazas de café habría facilitado la tarea.

Sin embargo, no basta con equipamientos caros y soluciones que consumen tiempo. «No hay recompensa por hacer las cosas bien», señala Barba. El secreto, según Nosek, reside en replantear los incentivos para asegurar que «lo que es bueno para un científico sea bueno para la ciencia». Por ejemplo, las agencias de financiación podrían optar por sufragar únicamente aquellos proyectos que incluyan un plan de transparencia. En 2016, los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) de EE.UU. elaboraron nuevas instrucciones para solicitar fondos, las cuales animaban a los científicos a pedir becas para mejorar la replicabilidad de sus trabajos. Hoy, los NIH exigen más información sobre la manera en que una propuesta se fundamentará en trabajos previos, así como una lista de variables que podrían influir en la investigación, como el sexo de los ratones usados en un experimento (un factor hasta hace poco subestimado y que causó que numerosos estudios describieran como universales fenómenos que se observaban solo en machos).

Por otro lado, cualquier pregunta que pueda hacer una agencia de financiación también podría formularla una revista científica o sus revisores. Nosek ve una solución prometedora en los «estudios prerregistrados», un protocolo por el que los investigadores han de informar sobre qué trabajo tienen pensado efectuar antes de llevarlo a cabo. Una revisión por pares evalúa la metodología (si es válida, si se basa en descubrimientos anteriores) y la revista se compromete a publicar los resultados sean estos cuales sean. De esta manera, la recompensa de publicar un artículo se concede a los experimentos bien diseñados, no a los resultados impactantes. Hay quien se pregunta si tales cambios no conducirán a una ciencia aburrida, pero Nosek discrepa. En estos momentos, está terminando dos investigaciones dedicadas a evaluar la influencia y la calidad de los primeros estudios prerregistrados, y los resultados preliminares indican que reciben tantas citas como los artículos tradicionales. Ello no obstante, Nosek señala que confiar demasiado en tales protocolos podría incentivar una investigación más conservadora, con el peligro de sobrecorregir el problema. Considera que lo ideal sería que el nuevo modelo funcionase en combinación con el tradicional, centrado en los resultados y más propenso a descubrimientos fortuitos.

Más difícil de resolver es la presión que obliga a los investigadores a generar resultados impactantes para poder vivir de su trabajo. Según Nosek, la solución requerirá un importante cambio cultural. Por el momento, no basta con investigar nuevas sendas y ampliar el mapa del conocimiento mostrando a otros dónde están los callejones sin salida. No vivimos en un mundo en el que los verificadores de información se hagan famosos.

Con todo, el problema de la reproducibilidad no implica necesariamente que la ciencia se haya descalabrado. «El progreso depende de los fallos», observa Richard M. Shiffrin, psicólogo de la Universidad Bloomington de Indiana que se muestra escéptico con la atención que está recibiendo esta «crisis». Sostiene que centrarse en la irreproducibilidad amenaza con eclipsar otros avances que sí consigue la ciencia. Y quienes sí piensan que hay una verdadera crisis no siempre disienten de esa conclusión. No obstante, Begley señala que el problema tiene consecuencias reales: los hallazgos que más tarde se demuestran incorrectos son tantos que los medicamentos llegan más despacio y con un coste mayor que el que tendrían si el sistema fuera más transparente. «Perdemos mucho tiempo por culpa de las pistas falsas», asegura.

El experimento del café fue un ejemplo. Corker, que completó su trabajo con compresas frías y calientes, demostró finalmente que no existían pruebas de que sostener un objeto cálido estimulase la cordialidad. Y aunque el trabajo original se publicó en una revista de élite, la verificación de Corker vio la luz en una de menor rango. Fue un descubrimiento, pero de otro tipo. Uno con menos *glamour*.

Shannon Palus es periodista en *Wirecutter*, un medio de The New York Times Company. Sus trabajos han aparecido en *Slate, Popular Science*, *Atlantic, Discover*, *Audubon, Quartz*, *Smithsonian* y *Retraction Watch*.

EN NUESTRO ARCHIVO

La reproducibilidad en biología. Veronique Kiermer en *IyC*, agosto de 2014.
Experimentos evanescentes. David Teira en *IyC*, noviembre de 2015.



HACIA UNA CIENCIA INTERDISCIPLINARIA

Para solucionar los complejos problemas globales de hoy, necesitamos ir más allá de la investigación compartimentada y alentar la labor conjunta

Graham A. J. Worthy y Cherie L. Yestrebsky

ILUSTRACIÓN DE NEIL WEBB



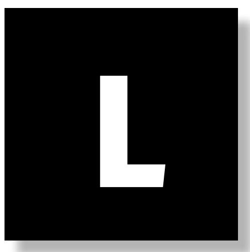




Graham A. J. Worthy es fundador y director del Centro Nacional para la Investigación Costera Integrada de la Universidad de Florida Central (UFC Coastal) y dirige el Departamento de Biología de esta universidad. Su investigación se centra en la respuesta de los ecosistemas marinos a las alteraciones de origen natural y humano.



Cherie L. Yestrebsky es directora asociada de UCF Coastal y responsable del Departamento de Química de la Universidad de Florida Central. Está especializada en química ambiental y en descontaminación.



La laguna Indian River, un somero estuario que bordea la costa este de Florida a lo largo de unos 250 kilómetros, sufre las actividades de la sociedad humana. La baja calidad del agua y la proliferación de algas tóxicas han causado la muerte de peces, manatíes y delfines, así como el asentamiento de especies invasoras. Pero las personas que viven en la región también tienen necesidades: el margen oriental de la laguna se encuentra protegido por una alineación de islas barrera que son fundamentales tanto para la economía, el turismo y la agricultura de Florida como para los lanzamientos espaciales de la NASA.

Al igual que en Florida, muchas otras costas del planeta afrontan graves problemas como resultado del crecimiento demográfico y la consiguiente contaminación. Además, los efectos del cambio climático no solo aceleran el deterioro ambiental, sino también el económico. En vista de todo lo que se halla en peligro, los científicos como nosotros —un biólogo y una química de la Universidad de Florida Central— sentimos la apremiante necesidad de realizar investigaciones que puedan orientar las decisiones políticas destinadas a mejorar la capacidad de respuesta y la sostenibilidad de las comunidades costeras. ¿Cómo podemos optimizar la ayuda que puede ofrecer nuestro trabajo para encontrar un equilibrio entre las necesidades ambientales y las sociales en el marco de nuestros sistemas políticos y económicos? Ese es el nivel de complejidad que los científicos deben abordar, en lugar de rehuir de él.

Pese a que las nuevas tecnologías cumplirán con certeza una función clave a la hora de tratar cuestiones como el cambio climático, la elevación del nivel del mar y las inundaciones costeras, no podemos depender únicamente de la innovación. Por ese motivo, para aportar soluciones, los científicos deberán adoptar un enfoque de equipo interdisciplinario, una práctica común en el mundo empresarial pero relativamente poco frecuente en el académico.

No cabe duda de que las universidades conforman una extraordinaria fuente de fuerza intelectual. Pero tanto estudiantes como docentes suelen estar compartimentados en departamentos o divisiones académicas. Los científicos se forman utilizando las herramientas y el lenguaje de sus respectivas disciplinas y aprenden a comunicarse mutuamente sus descubrimientos empleando una jerga específica.

Esa dinámica cobra mucho sentido cuando el objetivo de una investigación consiste en comprender en profundidad un sistema físico o biológico dentro de un ámbito específico. Pero cuando la investigación trata de resolver un problema que va más allá de un sistema cerrado y engloba, además, sus repercusiones en la sociedad, la compartimentación genera una serie de barreras. Por un lado, puede limitar la creatividad, la flexibilidad y la agilidad y, por otro, puede disuadir a los científicos de colaborar con otras disciplinas. Como profesores, tendemos a formar a los estudiantes a nuestra imagen y semejanza, sin reparar en que generamos especialistas que después tienen dificultades en comunicarse con los científicos del edificio de al lado, y no digamos con el público. En ese sentido, la compartimentación en la ciencia no es efectiva para responder ante cuestiones de desarrollo relacionadas con actuaciones políticas y de planificación, como la futura adaptación de las poblaciones costeras y los ecosistemas del planeta a la elevación del nivel del mar.

CIENCIA CON VISIÓN GLOBAL

Como científicos que residimos y trabajamos en Florida, nos dimos cuenta de que debíamos adquirir más relevancia a la hora de ayudar a nuestro estado —y a nuestro país— a fundamentar con pruebas fehacientes las decisiones tomadas en materia de vulnerabilidad costera. Nuestra intención era evaluar exhaustivamente las repercusiones, tanto de origen natural como humano, en la salud, la recuperación y la sostenibilidad de nuestros sistemas costeros, así como llevar a cabo una investigación integrada a largo plazo.

Primero nos ocupamos de ampliar la capacidad científica de nuestros programas de biología, química e ingeniería, cuya presencia era fuerte en cualquier estudio costero. Seguidamente, nuestra universidad anunció una Iniciativa de Agrupamiento Docente con el objetivo de diseñar equipos académicos interdisciplinarios que trabajaran en la resolución de los problemas sociales del futuro más difíciles. Al elaborar nuestra propuesta, descubrimos que el campus de Orlando ya contaba con 35 docentes especializados en cuestiones costeras. Pertenecían a 12 departamentos de siete facultades y muchos de ellos no se habían

conocido nunca. Se hizo evidente que el mero hecho de trabajar en el mismo campus no bastaba para poder colaborar.

Así, decidimos crear un equipo de expertos procedentes de una amplia variedad de disciplinas que trabajarían a diario en estrecha colaboración. Los miembros de ese equipo también servirían de enlaces con el personal especializado de los respectivos departamentos académicos a los que pertenecían. Al comienzo, hallar expertos que verdaderamente quisieran sumarse a la idea de equipo fue más difícil de lo que habíamos pensado. Aunque la noción de investigación interdisciplinaria no es nueva, no siempre se ha fomentado en el mundo académico. A algunos docentes todavía les preocupa que trabajar de ese modo pueda poner en peligro su reconocimiento a la hora de solicitar subvenciones, tratar de ascender o publicar artículos en revistas de gran impacto. Pero con ello no estamos insinuando que deberían desmantelarse los departamentos académicos tradicionales. Al contrario, estos dotan a la investigación de la profundidad necesaria, mientras que el equipo interdisciplinario alienta la labor conjunta.

Nuestra propuesta de agrupación tuvo éxito, y en enero del presente año nació el Centro Nacional para la Investigación Costera Integrada (UCF Coastal). Nuestra finalidad consiste en orientar un desarrollo económico más efectivo, la gestión ambiental, la planificación de mitigación de riesgos y las medidas públicas aplicadas a las comunidades costeras. Con el objetivo de adaptar mejor la ciencia a las necesidades sociales, hemos reunido a biólogos, químicos, ingenieros y biomédicos con antropólogos, sociólogos, politólogos, planificadores, gestores de emergencias y economistas. Cuando un grupo de personas con distintas formaciones y experiencias vitales tratan diversos temas alrededor de una taza de café, suelen surgir las formas más creativas de enfocar viejos problemas. Al fin y al cabo, «interdisciplinario» no implica una simple combinación de diferentes disciplinas de ciencia y tecnología. En el ámbito académico, analizar las repercusiones del cambio climático exige una inclusión más rigurosa de las ciencias sociales, un área frecuentemente ignorada.

Al igual que otras instituciones, la Fundación Nacional para la Ciencia de EE. UU. ha exigido hace poco que todos los proyectos de investigación incorporen a miembros de las ciencias sociales en un intento de valorar el mayor alcance de las propuestas. Lamentablemente, en muchos casos se añade a un sociólogo solo por marcar una casilla en la solicitud antes que por adquirir un verdadero compromiso para que la disciplina se contemple en un proyecto. Pero las necesidades sociales, económicas y políticas deben considerarse en el mismo momento de idear la investigación, no después. De lo contrario, nuestro trabajo podría fracasar en la fase de implementación y, por tanto, seríamos menos efectivos de lo que podríamos para resolver problemas del mundo real. Como consecuencia, la sociedad podría volverse escéptica respecto a cuánto pueden contribuir los científicos para encontrar soluciones.

CONECTAR CON LOS CIUDADANOS

La realidad es que dar a conocer a la sociedad los resultados de las investigaciones supone una responsabilidad cada vez mayor para los científicos. Esa comunicación tiene un efecto cuantificable en el modo en que los políticos priorizan las medidas, la financiación y las regulaciones. UCF Coastal ha nacido en un mundo donde no siempre se respeta la ciencia, incluso a veces se la tacha de enemiga. La confianza en la ciencia se ha visto minada en los últimos años y debemos esforzarnos en recuperarla con mayor deliberación. Hemos hallado que los ciudadanos quieren ver estudios académicos de calidad basados en los problemas sociales que nos afectan. De ahí que estemos fusionando la investigación académica pura con la aplicada a fin de centrarnos en las cuestiones más inmediatas (como ayudar a una ciudad o a un negocio a recuperarse del huracán Irma) y también a largo plazo (como aconsejar a una comunidad sobre el modo de fortalecer su capacidad de respuesta ante unas inundaciones cada vez más frecuentes).

Los científicos no podemos pretender explicar las implicaciones de nuestras investigaciones al gran público si primero no podemos comprendernos entre nosotros. Una ventaja de trabajar juntos de forma habitual es que se crea un lenguaje común que reconcilia los distintos significados que pueden poseer las mismas palabras para diferentes especialistas. Finalmente, estamos aprendiendo a hablar entre nosotros con mayor claridad y a entender de forma más explícita el lugar que ocupan nuestros nichos específicos en la visión conjunta. También hemos cobrado mayor conciencia del papel de la cultura y la industria como impulsoras del proceso de adopción de consensos y medidas. UCF Coastal prefiere no limitarse a entregar a los planificadores urbanos una pila de artículos de investigación para luego marcharse; se ve a sí misma como una colaboradora que escucha en lugar de sermonear.

Este tipo de misiones académicas no solo tienen relevancia para todo lo relacionado con el cambio climático, sino también para cada aspecto de la sociedad moderna, incluida la ingeniería genética, la automatización, la inteligencia artificial, etcétera. El lanzamiento de UCF Coastal se ha ganado la atención de la industria, las agencias gubernamentales, las comunidades locales y los académicos. En nuestra opinión, el éxito se debe a que los expertos desean unirse para resolver problemas pero carecen de unos mecanismos adecuados para conseguirlo. Esperamos poder ser ese medio y al mismo tiempo inspirar a otras instituciones académicas para que sigan el ejemplo.

Después de todo, llevamos años oyendo «piensa globalmente, actúa localmente» y que «toda política es local». La laguna del Río Indio de Florida solo se recuperará si tiene lugar una colaboración entre residentes, industrias locales, académicos, agencias gubernamentales y organizaciones sin ánimo de lucro. Como científicos, forma parte de nuestra responsabilidad ayudar a todos los participantes a comprender que los problemas que tardan décadas en crearse también tardan décadas en resolverse. Debemos ofrecer las soluciones más útiles explicando al mismo tiempo la complejidad de las concesiones que debe hacer cada parte. Pero lograrlo solo será posible si nos vemos a nosotros mismos como parte de una perspectiva interdisciplinaria y de comunidad global. Si nos dedicamos a escuchar y responder a los miedos y las preocupaciones, podremos defender mejor por qué las decisiones con fundamentos científicos serán efectivas a largo plazo.

PARA SABER MÁS

Interdisciplinarity. Número especial de *Nature*, vol 525, septiembre de 2015. Disponible en **nature.com/inter**

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Se acabaron los genios? Agustí Lledós en *IyC*, abril de 2011.

por David Romero, Lorena Coelho, Diego Queirolo y José Carlos Guerrero

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

El declive del aguará guazú

El mayor cánido de América del Sur está en regresión. ¿Por qué?

El aguará guazú, o lobo de crin (*Chrysocyon brachyurus*), es el mayor cánido de América del Sur. Históricamente la especie se hallaba en seis países: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay, Perú y Uruguay. Hoy, en cambio, está catalogada como casi amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, porque está sufriendo una clara regresión, sobre todo en las zonas más meridionales: prácticamente ha desaparecido de Uruguay, de gran parte del estado de Río Grande del Sur en Brasil y de todas las latitudes superiores a los 32 grados en Argentina.

Para esclarecer las causas de dicho declive, los científicos empleamos modelos matemáticos que permiten establecer la relación entre el patrón de distribución actual del aguará guazú y los factores ambientales que podrían estar afectándolo. En un trabajo publicado el pasado abril en *Mammalian Biology*, nuestro grupo ha analizado un gran número de dichos factores, entre ellos el espacio geográfico ocupado por el cánido, el tipo de cobertura del suelo (bosques, pastos, cultivos, marismas), la actividad humana, la topografía y el clima. Nuestros resultados indican que una combinación del espacio ocupado, la proporción de hábitats naturales abiertos y alejados de zonas de alta actividad humana (como carreteras y ciudades), y una elevada precipitación anual explican la distribución actual del aguará guazú.

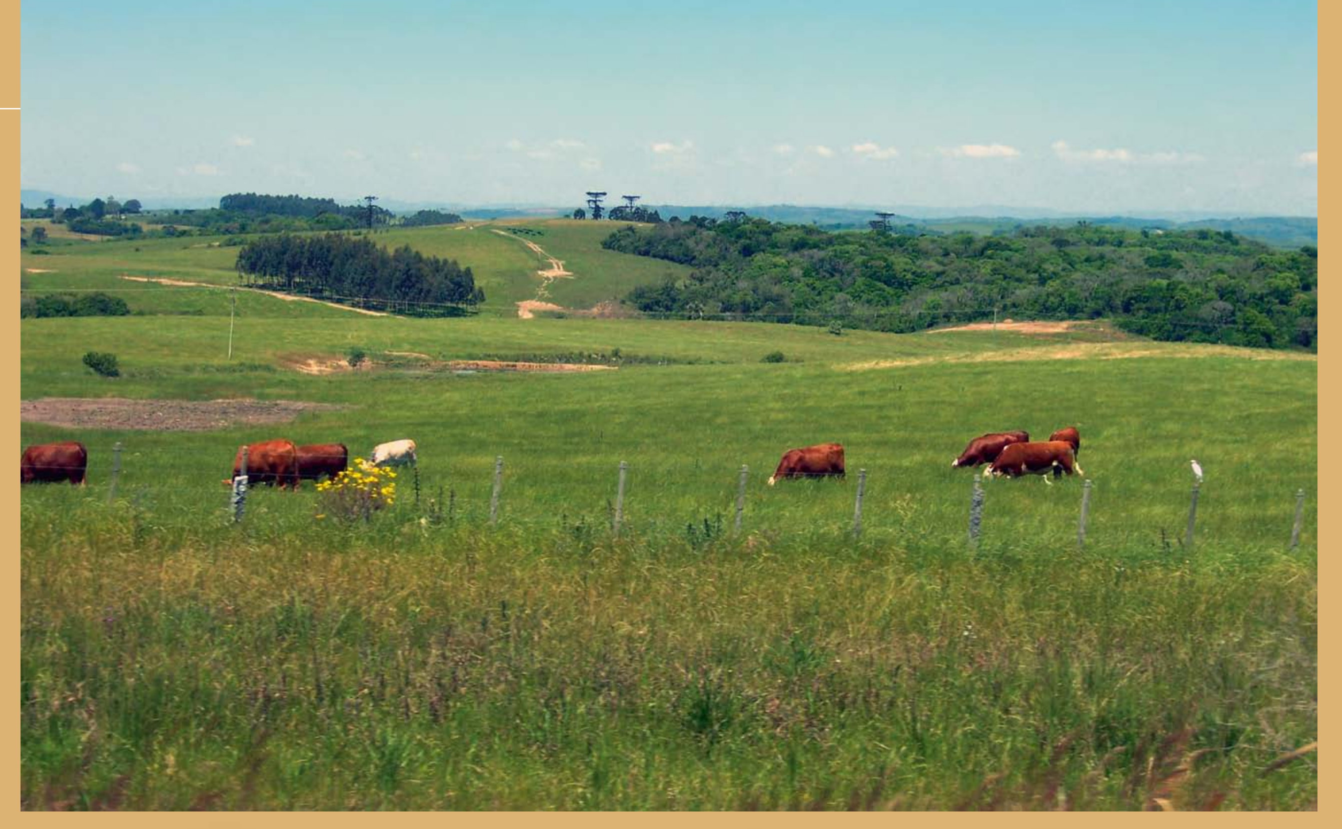
La dinámica de tal distribución aún responde al origen biogeográfico histórico de la especie, configurado por las fluctuaciones climáticas de finales del Pleistoceno e inicios del Holoceno. Un núcleo de alta densidad de individuos en el Cerrado (zona de sabana tropical) de Brasil, rodeado de territorios favorables en el sureste y centro de ese país, el sur de Paraguay y el noroeste de Argentina, parece definir bien esa dinámica. La pérdida de poblaciones se registra mayoritariamente en las regiones periféricas. La lejanía respecto al núcleo hace a estas poblaciones más vulnerables, que sufren, además, la transformación del uso del suelo, de pastos nativos a zonas agrícolas y ganaderas. También se ven afectadas por el tráfico de vehículos y la mayor densidad poblacional humana, unas alteraciones que se han intensificado durante la última década. Esta situación está reduciendo muy posiblemente la diversidad genética del aguará guazú y la viabilidad de su población global. Los resultados de nuestro estudio pueden ayudar a definir medidas de gestión y conservación adecuadas para salvar a este mamífero emblemático de Sudamérica.

—**David Romero, Lorena Coelho** y **José Carlos Guerrero**
Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

—**Diego Queirolo**
Centro Universitario de Rivera, Universidad de la República, Rivera, Uruguay



LA FIGURA ESBELTA DEL AGUARÁ GUAZÚ le permite observar por encima del alto estrato herbáceo en campos del Parque Nacional de la Sierra de Canastra, en Minas Gerais.



EN EL SUR del estado brasileño de Río Grande del Sur, los pastos abiertos favorables para el aguará guazú están alterados aquí por la presencia del ganado y otros elementos antrópicos como el alambrado, el tendido eléctrico y los bosques artificiales de pino, factores todos ellos que perjudican a las poblaciones del cánido.

UNA DENSA CRIN y unas extremidades largas caracterizan al aguará guazú. Este ejemplar se desplaza en el Cerrado del Brasil, una zona de sabana tropical que es el principal ambiente donde habita esta especie (*izquierda*). En una vista frontal, el cánido exhibe la garganta blanca característica, así como unos grandes pabellones auditivos (*derecha*).

por Miquel Carandell Baruzzi



Miquel Carandell Baruzzi, doctor en historia de la ciencia por la Universidad Autónoma de Barcelona, centra su investigación en la historia de la ciencia en Barcelona y en la historia de la paleoantropología. Además, es el encargado de la biblioteca y el archivo del Museo de Ciencias Naturales de Granollers.

Unión y desunión

El *brexit* y la diplomacia científica, ejes del congreso conjunto de la Sociedad Europea de Historia de la Ciencia y la Sociedad Británica de Historia de la Ciencia

El descalabro que supuso para muchos británicos el resultado del referéndum sobre la continuidad del Reino Unido en la Unión Europea, el *brexit*, tuvo una enorme influencia tanto en la gestación como en el desarrollo del octavo congreso de la Sociedad Europea de Historia de la Ciencia (ESHS, por sus siglas en inglés), que, ex profeso, se hizo coincidir con el encuentro anual de la Sociedad Británica de Historia de la Ciencia (BSHS, en inglés). Este congreso conjunto, celebrado en Londres el pasado septiembre bajo el lema *Unity and disunity*, tuvo como objetivo reflexionar e incluso contrarrestar los efectos que ya está teniendo el *brexit*, mostrando la unidad entre la comunidad europea de investigadores en historia de la ciencia.

Como es habitual en este tipo de congresos, las sesiones abarcaron un amplio abanico de disciplinas: de las matemáticas árabes a la genética del siglo xx, pasando por la siempre problemática relación entre ciencia y religión, la historia natural, la ingeniería o la arqueología. Una de las sesiones, titulada «Science in translation», trató sobre las traducciones y viajes de obras asiáticas por todo el mundo, con ejemplos como los libros de astronomía de la China Ming que viajaban a Europa, el conocimiento entomológico que iba de Japón a China o las vacunas que llegaban a Asia. Otra sesión estuvo dedicada a la «pequeña ciencia» (*little science*), término que, en contraposición a «gran ciencia» (*big science*), describe la ciencia de nivel internacional pero desarrollada por grupos con pocos recursos e infraestructuras.



EL DESARROLLO DE LA QUÍMICA tras la Primera Guerra Mundial vino marcado por las tensiones diplomáticas entre Estados. Así lo mostró en la primera sesión plenaria del congreso el catedrático emérito de Oxford Robert Fox.

SOCIEDAD BRITÁNICA DE HISTORIA DE LA CIENCIA

También se organizaron varias mesas redondas en forma de debate sobre el momento que vive la historia de la ciencia. En una de ellas, sobre historia y activismo político, se discutió qué papel puede o podría desempeñar la historia de la ciencia en causas como las del feminismo, los derechos de los colectivos LGTBI o la defensa ambiental.

El giro diplomático

La temática general del congreso también influyó en las sesiones, que pusieron especial énfasis en los esfuerzos científicos colectivos, la circulación del conocimiento entre distintas áreas geográficas, la ciencia en los contextos coloniales, las continuidades y discontinuidades en la historia de las disciplinas y, especialmente, en la diplomacia. Una gran sesión, dividida en cuatro partes, estuvo dedicada a la diplomacia científica y a su papel en muy variados contextos históricos, sobre todo centrados en las diferentes fases del siglo xx. La ciencia es fundamental para entender las relaciones diplomáticas internacionales y, por tanto, la historia misma de estos períodos. A su vez, la diplomacia está íntimamente ligada a la creación del conocimiento científico.

Tal y como apunta Maria Rentetzi, de la Universidad Técnica Nacional de Atenas, que lidera un proyecto europeo sobre la historia de la exposición y protección contra la radiación, el estudio de la diplomacia científica podría ser, o tal vez sea ya, el nuevo «giro» dentro de la historiografía de la disciplina. Desde hace algunos años, la historia de la ciencia se ha hecho eco de los distintos giros historiográficos. A medida que se va formando un grupo de investigadores, congresos y

publicaciones dedicados a un aspecto concreto del análisis histórico de la ciencia, y otros investigadores empiezan a tener en cuenta este aspecto en sus trabajos, se dice que la disciplina está haciendo un giro hacia esa temática. Buenos ejemplos podrían ser el giro material, que demostró la importancia de los instrumentos científicos y la cultura material de la ciencia; el giro visual, que evidenció el modo en que las imágenes han desempeñado funciones de gran relevancia en la ciencia; o el giro espacial, que se dedicó a estudiar el papel de los espacios en que se realiza, enseña o divulga la ciencia.

El auge de la investigación en historia de la diplomacia científica se hizo patente porque centró, en mayor o menor medida, dos de las cuatro sesiones plenarias del congreso. La primera de ellas estuvo a cargo de Robert Fox, catedrático emérito de la Universidad de Oxford, quien recibió el premio Gustav Neuenschwander de la Sociedad Europea de Historia de la Ciencia al conjunto de su carrera. Experto en las relaciones científicas entre Francia y el Reino Unido, Fox mostró los intereses diplomáticos tras la creación, en 1927, de la Casa de la Química (Maison de la Chimie), un centro de investigación parisiense para químicos de todo el mundo. Pese a tratarse de un proyecto de apariencia universal, la participación de los distintos países no respondió a criterios científicos, sino a intereses diplomáticos. Los nuevos países independientes en Latinoamérica y en Europa se implicaron con entusiasmo en el proyecto, mientras que Estados Unidos o el Reino Unido, recelosos del poder francés, lo hicieron de forma más cautelosa. Especialmente interesante fue la pequeña aportación de Alemania, que, a pesar de ser una potencia en química, fue apartada de las organizaciones científicas internacionales tras la Primera Guerra Mundial.

Aprovechando su condición de primer conferenciante plenario, y ante todos los participantes del congreso, Fox cerró su presentación con un alegato en contra del *brexit* y a favor de la permanencia del Reino Unido en la Unión Europea, unión que alabó sin ninguna crítica a sus políticas económicas o a su gestión de la crisis de los refugiados.

En otra de las sesiones plenarias, Ana Simões, profesora de la Universidad de Lisboa y nueva presidenta de la ESHS, entrelazó el análisis de la reciente situación de la historia de la ciencia como disciplina con su investigación sobre Abbé Correia da Serra (1750-1823). Este naturalista portugués fue, a la vez, un brillante científico, con contactos e influencia en personajes de la talla del botánico británico Joseph Banks o el ilustrado americano Thomas Jefferson, y un activo diplomático, siendo el primer embajador de su país en Estados Unidos. Dos papeles que no se pueden explicar por separado.

Simões utilizó el caso de Correia da Serra para mostrar el modo en que la ciencia y los científicos de países supuestamente periféricos —al menos en lo que respecta a la ciencia moderna— también contribuyeron a ese esfuerzo colectivo de la ciencia de primer orden. De hecho, según explicó Simões, desde hace más de una década varios grupos de historiadores de la ciencia se han dedicado al estudio de esa ciencia puntera hecha en la periferia. Expertos que han ido más allá del análisis de esa contribución puntual y han mostrado que la ciencia desarrollada, comunicada y enseñada en estos países tiene relevancia por sí misma, aunque en apariencia no forme parte de las corrientes científicas internacionales.

La ciencia es fundamental para entender las relaciones diplomáticas internacionales

Seguimos siendo anglo y eurocéntricos

El congreso tenía el ánimo de tender puentes entre los historiadores británicos y los del resto de Europa, y la verdad es que los contactos existen y son cada vez más sólidos. Ahora bien, una parte de la comunidad anglosajona a menudo rebate, o directamente ignora, planteamientos como el de Simões, para argumentar que la ciencia que merece la pena ser estudiada es aquella cuya contribución ha influido en el desarrollo de la ciencia moderna. Además, tradicionalmente, los historiadores británicos se prodigan poco en los congresos de la ESHS, aunque el mismo Fox fuera uno de sus fundadores. De hecho, la comunicación entre los investigadores europeos y los anglosajones sigue siendo mayormente unidireccional. Oxford, Cambridge y otras universidades británicas acogen en su seno a miles de estudiantes y profesores de diferentes niveles, mientras que las estancias de investigadores anglosajones en centros europeos, quizás a excepción de Berlín y París, es mucho más limitada. Así pues, hay comunicación, hay unión, pero sigue habiendo importantes obstáculos que también nos muestran cierta falta de entendimiento (esa desunión) entre comunidades de expertos.

Y fuera de Europa, la situación es todavía peor. Dejando a un lado a los países emergentes, como Brasil o China, la representación de investigadores de otras zonas del mundo en el congreso fue muy reducida. Si la historia de la ciencia en las periferias europeas, como Portugal, merece la pena ser estudiada, también lo merece la historia del conocimiento del resto del mundo, de Colombia a Camerún y de Indonesia a Nueva Zelanda. Quizá va siendo hora de que grandes sociedades científicas de este tipo, además de luchar contra el *brexit*, utilicen sus recursos para promocionar las universidades, los científicos y la investigación de los países más desfavorecidos. Considerando las evidentes dificultades económicas y sus muchos otros problemas, este apoyo podría significar una pequeña aportación para que estos puedan pensar en algo más que saltar vallas y cruzar mares. Quizá deberíamos dejar de lado el hecho de pensar en ser europeos y excluir así a casi todo el mundo, y pensar, cada vez más, en ser globales. Un enfoque en el que el estudio de la historia de la diplomacia científica puede generar muchas e interesantes contribuciones. IyC

PARA SABER MÁS

Little science, big science. Derek J. de Solla Price. Columbia University Press, 1963.

Citizen of the world: A scientific biography of the Abbe Correia da Serra. Ana Simões, Maria Paula Diogo, Ana Carneiro. Institute of Governmental Studies Press, Berkeley, 2012.

Science, celebrity, diplomacy: The Marcellin Berthelot centenary, 1927. Robert Fox en *Revue d'Histoire des Sciences*, vol. 69, n.º 1, págs. 77-115, 2016.

Living with radiation or why we need a diplomatic turn in history of science. Maria Rentetzi en *Kjemi*, n.º 6, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las repercusiones del Brexit. Inga Vesper en *IyC*, diciembre de 2017.

por María Gaspar Alonso-Vega

María Gaspar Alonso-Vega es presidenta de la Comisión de Olimpiadas de la Real Sociedad Matemática Española. Participó por primera vez en la Olimpiada Internacional de Matemáticas en 1983. Desde entonces, ha sido en numerosas ocasiones jefa de la delegación española de esa competición.

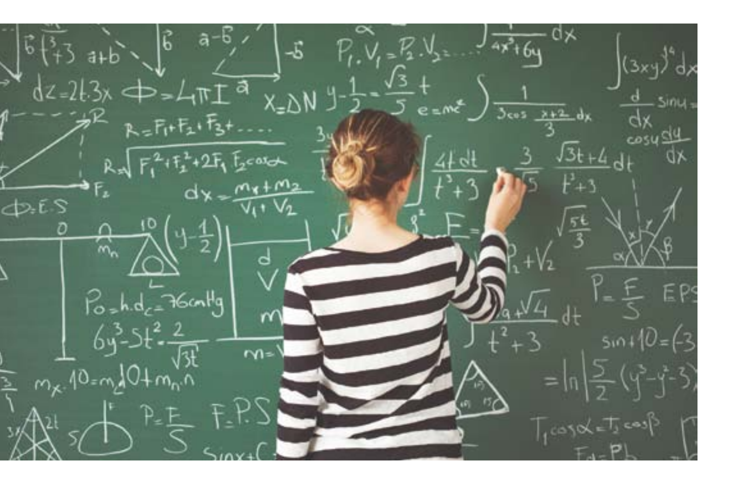


Impulsar las olimpiadas matemáticas

Cantera de futuros científicos, merecen el apoyo de las instituciones

Aunque menos conocidas que las deportivas, las olimpiadas científicas son hoy una realidad, y bien afianzada. Las de matemática, que se celebran a escala local, nacional y mundial, son las más veteranas. Han servido de inspiración y modelo a las de física, las de química y las de biología.

Este último verano, la Olimpiada Internacional de Matemática (OIM) ha regresado a su lugar de origen, Rumanía. En 1959, la Sociedad Rumana de Matemáticas y Física invitó a siete países de su entorno a participar en una competición para estudiantes de secundaria, que durante dos días se enfrentarían a una serie de problemas de matemáticas que debían resolver individualmente y en un tiempo limitado. ¡Cuánto ha crecido la OIM desde entonces! De delegaciones de siete países en 1959 hemos pasado a 106, con casi 600 estudiantes de los cinco continentes en su última edición. En la olimpiada están representadas todas las culturas, razas, religiones e idiomas, pero, por asombroso que parezca, los jóvenes participantes se entienden a través de las matemáticas y comparten experiencias y problemas.



Aunque la OIM es una competición individual, los estudiantes se agrupan por delegaciones nacionales. En sus primeras ediciones, solo participaban países de la Europa del Este. Hasta 1965 no se incorporó un país occidental, Finlandia. Desde entonces, la OIM se fue abriendo poco a poco, primero al resto de Europa, después a América, Asia y, finalmente, a África. España se incorporó en 1983.

Desde su nacimiento, la OIM sigue sus propios usos y costumbres. El jurado, formado por los jefes de delegación (más de cien personas) de los países participantes, sigue siendo su único órgano ejecutivo y toma sus decisiones colegiada y democráticamente. Teniendo en cuenta los distintos sistemas educativos de los países y la diversa formación matemática de sus estudiantes, año tras año consigue ponerse de acuerdo para redactar los enunciados y traducirlos a los idiomas maternos (57 en 2018) de los concursantes.

En la OIM, aproximadamente la mitad de los concursantes recibe un premio, en forma de medalla de oro, plata o bronce. Pero ¿garantiza esto un futuro brillante como matemático profesional? Es indudable que los medallistas tienen un don especial para las matemáticas y han dado pruebas de sentir por ellas el interés y la pasión necesarios para desarrollar, durante la vida adulta, todo su potencial. Buena prueba de ello son los nombres que se repiten más tarde en las Medallas Fields, consideradas el «Premio Nobel» de las matemáticas: Peter Scholze y Ashay Venkatesh en la última edición; Terence Tao, tal vez el más conocido; Maryam Mirzakhani o Artur Ávila, la única mujer y el único latino, respectivamente, que hasta la fecha han conseguido el galardón.

¿Y en nuestro país? La Olimpiada Matemática Española (OME) ha demostrado ser una estupenda cantera de matemáticos, y como tal, debería ser apoyada e incluso mimada por todas las administraciones educativas. Ningún país debería desperdiciar su principal fuente de riqueza: los jóvenes. Surgida por iniciativa de la Real Sociedad Matemática Española (RSME), la OME celebrará este curso su edición número 55. Desde 1964, siempre había contado con el apoyo del Ministerio de Educación, cualquiera que fuera el color del Gobierno de turno y sobreviviendo a distintos planes de estudios. Gracias a la colaboración entre el Ministerio y la RSME, España organizó, con gran éxito, una OIM y dos Olimpiadas Iberoamericanas. Pero primero la crisis y más tarde algunos cambios en la legislación sobre ayudas y subvenciones fueron dando al traste con las ayudas institucionales para financiar los eventos.

Resulta asombroso que miles de adolescentes gasten energías y esfuerzo, peleándose con los problemas, sin esperar más gratificación que el placer de haber desentrañado el misterio que cada uno de ellos encierra. También lo es que tantos profesores les acompañen para guiarlos en este recorrido, sin que ello les suponga promoción profesional de ningún tipo, ni les compute su trabajo, altamente especializado, como lectivo. Pero ni la ilusión ni el esfuerzo de todos ellos pueden pagar las facturas de los billetes necesarios para acudir a las citas internacionales ni las de organización de la olimpiada nacional. El apoyo económico es imprescindible.

Afortunadamente, parece que en estos últimos tiempos la situación de desamparo institucional que hemos vivido comienza a revertirse. Confiemos en que nuestro Gobierno encuentre, como es su deseo, la fórmula que dentro de la ley le permita de nuevo contribuir, con el apoyo económico necesario, a ese pequeño milagro que, cada año, significa la celebración de una nueva edición de la olimpiada. Nuestros jóvenes olímpicos, que serán los matemáticos y científicos españoles del siglo XXI, se lo merecen, como también se lo merece el país. Sin ellos, no tendremos futuro. IyC

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.



Kombucha

El té fermentado entra con fuerza en la gastronomía occidental

La fermentación es una de las técnicas más antiguas que se conocen para la conservación de alimentos. Sobre todo en los países asiáticos, es muy común aplicarla a pescados, carnes y verduras. Paradójicamente, en pleno siglo XXI se ha convertido en tendencia culinaria con una gran proyección de futuro.

De entre todas las fermentaciones alimentarias, la kombucha es la que ha irrumpido con mayor fuerza: su expansión es exponencial. Según cuenta una leyenda, se denomina así por la combinación de Kombu, apelativo de un monje tibetano, y *cha*, nombre genérico que da la población china al té. Significaría, por tanto, «té de kombu».

Se trata de una bebida elaborada a partir de té endulzado y fermentado mediante un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras (SCOBY, por sus siglas en inglés) que vulgarmente se denomina hongo del té. Suele obtenerse a partir de hojas de té negro, resultado de la fermentación de las hojas de *Camellia sinensis*; pero también se puede elaborar a partir de hojas de té oolong, té semifermentado, té verde o incluso blanco. Basta con introducir en un recipiente el té, el azúcar y la «kombucha madre» con la mencionada mezcla de microorganismos.

De entre todos los estudios que se han realizado para determinar la microbiología de la kombucha, el más detallado es el que Alan J. Marsh y sus colaboradores del Colegio Universitario de Cork publicaron en abril de 2014 en *Food Microbiology*. Según este, el principal género bacteriano de la colonia es *Gluconacetobacter* (presente en más del 85 por ciento de las muestras); contiene también una población prominente de *Lactobacillus* (30 por ciento) y solo trazas de *Acetobacter* (menos del 2 por ciento). Respecto a las poblaciones de levadura, están dominadas por *Zygosaccharomyces* (más del 95 por ciento).

En el mundo gastronómico, las kombuchas han sido introducidas por grandes nombres. El holandés Jonnie Boer, del restaurante De Librije, utiliza la kombucha como elemento de cocción en su langosta cocida. René Redzepi, del Noma de Copenhagen, ha creado un área de investigación de fermentados entre los que la kombucha ocupa un lugar destacado. David Chang, del Momofuku en Nueva York, habló de la kombucha en la edición de 2011 del curso «Ciencia y cocina» que ofrece la Universidad Harvard. Mario Sandoval, en su restaurante Coque, sustituye el tradicional vinagre de los encurtidos por kombucha. Andoni Aduriz, del Mugaritz, combina kombucha madre con fresas. Y Joan Roca, en el Celler de Can Roca, ha incorporado en su equipo de investigación a un experto en fermentaciones que también tiene la kombucha en su base de trabajo.

Al consumo de la kombucha se le atribuyen ciertos efectos beneficiosos para la salud. Tradicionalmente se la ha relacionado con la longevidad. Para analizar la certeza de estas afirmaciones se han realizado diferentes estudios. Según el artículo de revisión que Jessica Martínez Leal, de la Universidad de Monterrey en México, y Rasu Jayabalan, del Instituto Nacional de Tecnología en Rourkela (India), publicaron junto con otros colaboradores en febrero de 2018 en *CyTA-Journal of food*, esta bebida contiene componentes bioactivos como polifenoles y ácido glucurónico, que actúan de forma sinérgica con efectos beneficiosos para la salud. Su consumo puede proteger contra el desarrollo de enfermedades cerebrovasculares (debido a su contenido en polifenoles), regula el metabolismo del colesterol y previene la hipertensión.



UN CULTIVO de bacterias y levaduras fermenta el té azucarado hasta convertirlo en kombucha.

La asignatura pendiente de la kombucha es su regulación. Si bien en Estados Unidos se ha constituido una asociación de productores, la KBI (Kombucha Brewers International), que marca las directrices de buenas prácticas en cuanto a los protocolos de seguridad, calidad y etiquetaje, en Europa todavía no existe ninguna organización que desempeñe esta función.

En el ámbito regulatorio se debate si pueden considerarse kombucha productos que han pasado por el proceso de fermentación pero que para su comercialización ya no conservan los microorganismos vivos. Otro foco de atención importante es la presencia de alcohol en algunas kombuchas como resultado de la fermentación. Por supuesto, hay que indicarlo de forma conveniente y cumplir con todos los protocolos que marcan las autoridades.

Como ha ocurrido con la cerveza artesana, probablemente la llegada de la kombucha a los hogares, no solo como consumidores sino como productores, es solo cuestión de tiempo. Sería importante establecer unas normas de seguridad alimentaria para que la elaboración se lleve a cabo con garantías. No olvidemos que la kombucha se obtiene mediante una fermentación y que, por tanto, requiere un control exigente.



BIODIVERSIDAD

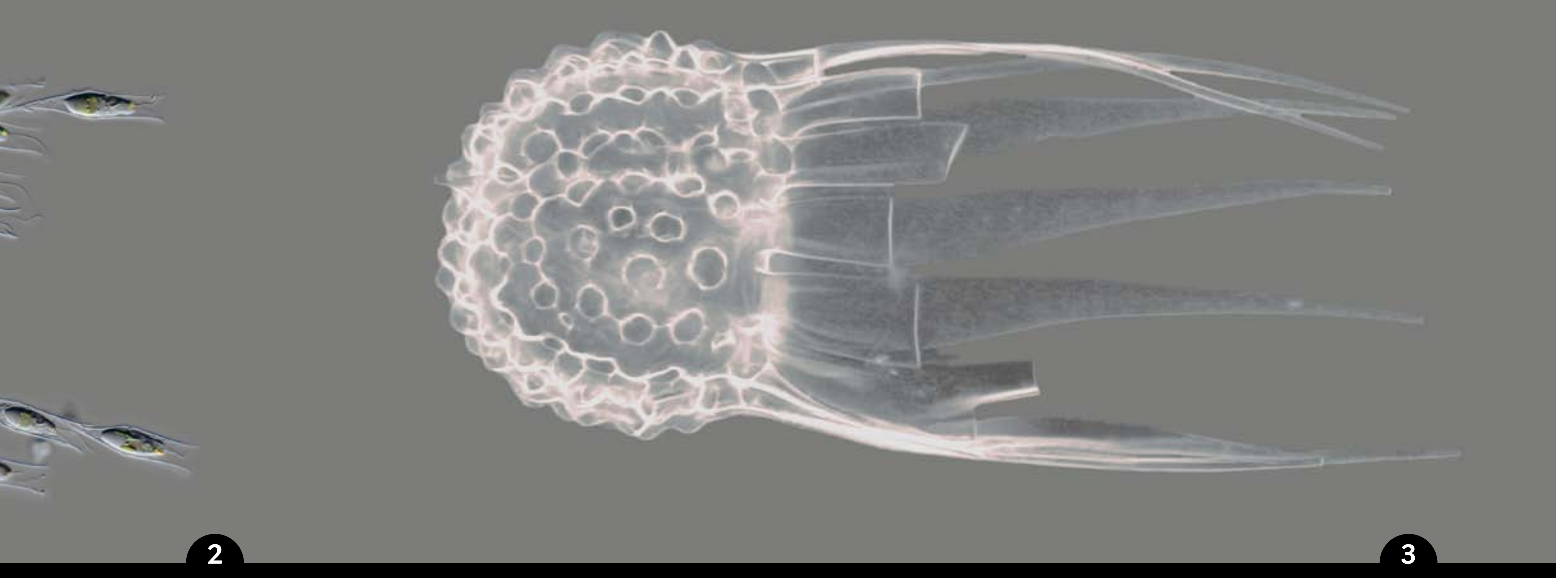
¿Con quién compar

Las últimas técnicas genéticas ponen en jaque la visión clásica de la biodiversidad de la Tierra

Iñaki Ruiz-Trillo y Maria Ferrer-Bonet

LOS ANÁLISIS GENÉTICOS han revelado la enorme diversidad de protistas unicelulares que existen en nuestro planeta. Aquí se muestran, en escalas distintas, *Frontonia* (1), *Dinobryon* (2), *Caclocyma petalospyris* (3), *Giardia muris* (4), *Acanthamoeba* (5) y *Vorticella campanula* (6).





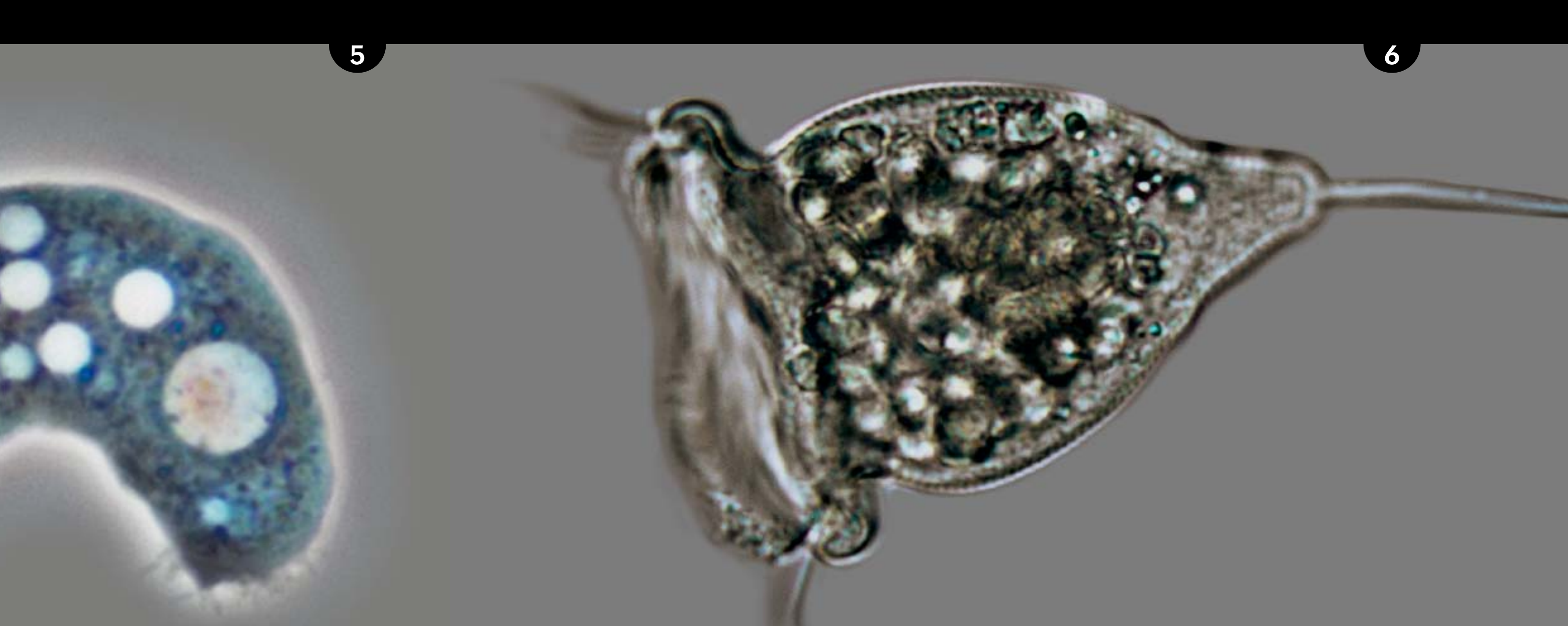
timos el planeta?

EN SÍNTESIS

Nuestra imagen de la biodiversidad del planeta ha cambiado drásticamente desde los primeros intentos de clasificar todas las especies existentes.

El descubrimiento de los microorganismos gracias a la microscopía transformaría nuestra idea sobre la biodiversidad. Pero el gran paso adelante se dio con el hallazgo del ADN y el desarrollo de las técnicas de secuenciación genética, las cuales revelaron una inesperada variedad de microorganismos protistas en todos los ambientes de la Tierra.

Admitir esta nueva realidad tiene importantes implicaciones más allá del conocimiento de la biodiversidad, porque los protistas pueden ofrecernos soluciones a numerosos problemas ambientales y de sostenibilidad.



«Existen certezas conocidas; es lo que sabemos que sabemos. Existen incertidumbres conocidas, es decir, lo que sabemos que no sabemos. Pero también hay incertidumbres desconocidas, lo que ni siquiera sabemos que no sabemos.»

—Donald Rumsfeld

Iñaki Ruiz-Trillo es profesor ICREA en el Instituto de Biología Evolutiva (CSIC-Universidad Pompeu Fabra), profesor asociado del Departamento de Genética, Microbiología y Estadística de la Universidad de Barcelona (UB) y miembro del Instituto de Investigación de la Biodiversidad (UB). Sus trabajos se centran en entender la evolución y la diversidad de los seres vivos.



Maria Ferrer-Bonet es lingüista, divulgadora científica y creadora de contenidos. Trabaja para múltiples instituciones y grupos de investigación, principalmente en el ámbito de la biología evolutiva.

La Tierra es hogar de una increíble diversidad. De gigantescas secuoyas a invisibles microbios. De frondosas selvas a desiertos aparentemente baldíos. Esta enorme variedad siempre ha fascinado a los humanos, quienes han intentado responder a la pregunta: ¿con quién compartimos el planeta?

El retorcido juego de palabras con el que Donald Rumsfeld, exsecretario de Defensa de EE.UU., respondió a la pregunta de si tenía la certeza de que Irak estuviese preparando armas nucleares resulta curiosamente adecuado para enmarcar el relato de este artículo. No nos centraremos aquí en la diversidad ya conocida, sino más bien en unos organismos que ni siquiera sabíamos que desconocíamos, unos seres que literalmente eludieron la mirada de los científicos hasta que la tecnología permitió su descubrimiento.

Pero la relevancia de estos organismos no radica solo en el hallazgo de su existencia. Su inesperada diversidad ha puesto en jaque nuestra visión del planeta al sacar a relucir nuestra propia ignorancia.

LO QUE CONOCEMOS

El estudio de la biodiversidad permite dar sentido al aparente caos de organismos que viven en nuestro planeta y crear un marco conceptual con el que poder abordar preguntas para entender la vida que nos rodea. Si bien el conocimiento sobre la biodiversidad se ha alimentado, a lo largo de la historia, de todo tipo de fuentes (procedentes de médicos, exploradores, culturas regionales, etcétera), la sistematización de su estudio se dio en el siglo XVIII, siendo Carlos Linneo uno de sus más conocidos exponentes. Dicha sistematización facilitó la comprensión del parentesco entre especies y su evolución, y permitió dibujar las primeras pinceladas del cuadro que debería representar la biodiversidad del planeta.

Por razones lógicas, los primeros esfuerzos en completar el catálogo de especies se centraron en aquellas formas de vida más aparentes: los animales, las plantas y los hongos. Estos tres grandes reinos acapararon nuestra atención hasta que se descubrió un mundo desconocido, antes solo intuido por algunos.

LO QUE NO SABÍAMOS QUE DESCONOCÍAMOS

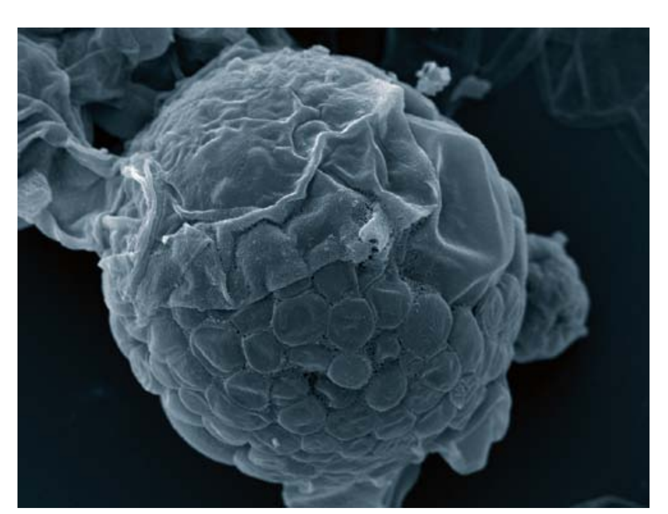
Mientras continuaban los esfuerzos para completar el catálogo, basado mayormente en la descripción de rasgos morfológicos, científicos contemporáneos de Linneo pulían detalles de una técnica que revolucionaría el estudio de la diversidad, la microscopía, la cual permitiría adentrarse en el fascinante mundo de los organismos unicelulares.

Gracias a ese avance, el siglo XIX fue testigo de una oleada de neologismos para dar cuenta de la enorme diversidad de seres vivos que emergía ante nuestros ojos. De esta forma, se empezaron a describir y clasificar nuevos organismos, incluidos los otros dos grandes dominios de vida conocidos hoy, las bacterias y las arqueas, y con ello se amplió el árbol de la vida.

Asimismo, se observó que la estructura celular de los tres grandes reinos de eucariotas compartía ciertas características, en particular la compartimentación del núcleo, separado del resto de la célula por una membrana. Tal rasgo empujó a que la comunidad científica los agrupara bajo el nombre de eucariotas, diferenciándolos así de los procariotas, microorganismos cuyo ADN se halla libre en el citoplasma, entre los que figuran las bacterias y las arqueas.

Pero, de forma sorprendente, se descubrió que algunos de los organismos microscópicos presentaban la misma estructura celular que los animales, las plantas y los hongos. Se acuñó entonces el término *protista* para incluir todo eucariota unicelular que no pudiera ser clasificado como animal, planta u hongo. En cualquier caso, según la visión clásica, basada en los métodos taxonómicos tradicionales, los protistas se consideraban (y siguen considerándose) una minoría: unas simples y curiosas formas de vida a partir de las cuales surgieron los tres grandes grupos de eucariotas multicelulares. De hecho, el 97 por ciento de las especies eucariotas formalmente descritas se incluyen en uno de estos tres grupos, mientras que los protistas corresponden al 3 por ciento restante.

Durante décadas, esta imagen ha representado la diversidad conocida de eucariotas del planeta: tres grandes reinos multicelulares que habían conquistado el planeta y convivían con sus modestos parientes unicelulares.



EL ESTUDIO DE LOS MICROORGANISMOS PROTISTAS resulta esencial no solo para conocer la biodiversidad de nuestro planeta, sino también para entender la vida tal como la conocemos hoy. *Sphaeroforma arctica*, una especie que vive en el agua de mar, presenta ciertos rasgos biológicos, como el estadio multicelular aquí mostrado, que han revelado aspectos clave sobre el origen y la evolución de los animales a partir de ancestros unicelulares.

¿Cómo se identifica un protista?

Los nuevos análisis de códigos de barras de ADN han supuesto un gran paso adelante en la descripción de un sinfín de especies nuevas de microorganismos protistas (eucariotas de estructura muy simple que comprenden los protozoos y las algas), que son omnipresentes en nuestro entorno. Abajo se detallan los principales pasos de estos análisis, que permiten conocer una o todas las especies que hay en una muestra, por ejemplo, de agua o de suelo.

Análisis de códigos de barras (*barcoding*)

Permite identificar un organismo a partir de su ADN.

Organismo desconocido

?

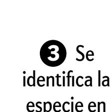
1 Se aísla y se secuencia el ADN del organismo.

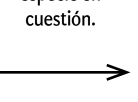
2 Se compara la secuencia de un gen universal (como el *18S* ribosómico) con una serie de códigos de barras de referencia correspondientes a la secuencia del gen en distintas especies.

Códigos de barras de referencia

Posibles especies

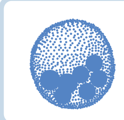




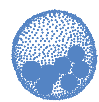


3 Se identifica la especie en cuestión.

Especie identificada



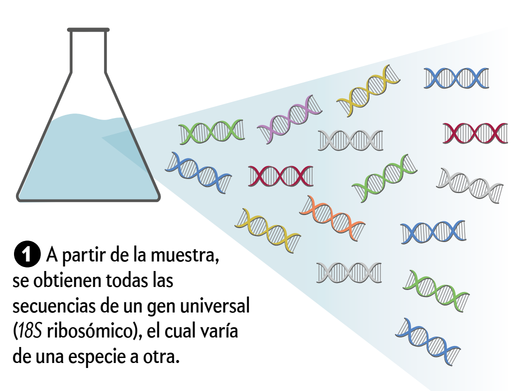






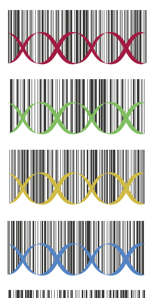
Análisis masivo de códigos de barras (*metabarcoding*)

Permite conocer todas las especies que hay una muestra del ambiente.



1 A partir de la muestra, se obtienen todas las secuencias de un gen universal (*18S* ribosómico), el cual varía de una especie a otra.

2 Se comparan a la vez todas las secuencias con una «biblioteca» de códigos de barras de referencia.



3 Se identifican las diferentes especies y su cantidad. Tal vez se detecten nuevas especies que no se hallan en la biblioteca.

Especies identificadas



Especies nuevas



LO QUE SABEMOS QUE DESCONOCEMOS

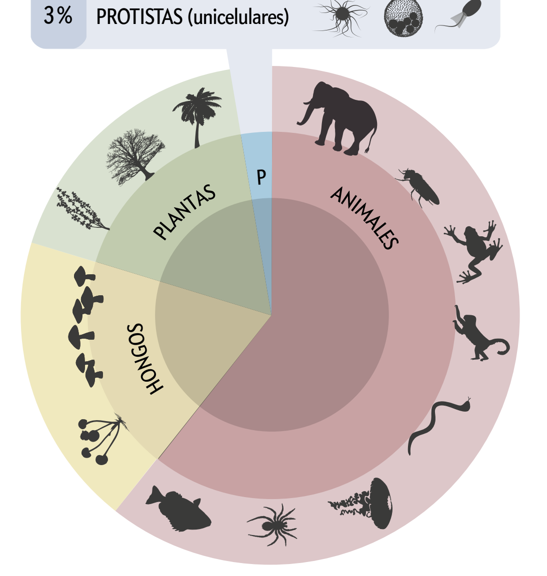
El descubrimiento del ADN hace apenas unas décadas y el posterior desarrollo de las técnicas de secuenciación desvelaron un catálogo de organismos de nuestro entorno totalmente distinto.

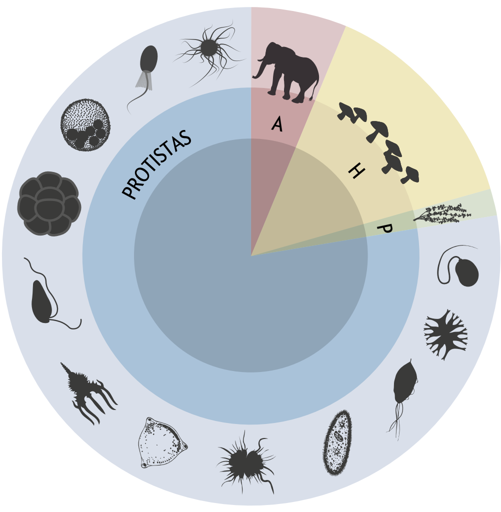
En primer lugar, se identificaron ciertos genes, denominados universales, cuyas secuencias son compartidas por todos los individuos de una especie pero varían de una especie a otra. En los eucariotas, un gen universal es el *18S* ribosómico. Su secuencia se emplea como un código de barras que permite saber a qué especie pertenece el ADN analizado, sea de un animal, una planta o un hongo. Nació así el análisis de códigos de barras genéticos (*barcoding*).

Más tarde, el desarrollo de las técnicas de secuenciación de alto rendimiento hizo posible secuenciar directamente del ambiente (mares, ríos, medio terrestre) una enorme cantidad de seres vivos, lo que dio lugar al análisis masivo de códigos de barras genéticos (*metabarcoding*). Este método ha permitido identificar el ADN de todos los organismos que contiene, por ejemplo, un litro de agua de mar, y obtener una radiografía de toda la diversidad (todas las especies) presentes en esa muestra. La creación de un catálogo de códigos de barras correspondientes a las especies que viven en diferentes ecosistemas supone un avance cuyos resultados no dejan de sorprendernos.

Sin duda, la aportación más llamativa del análisis masivo de códigos de barras al estudio de la biodiversidad ha sido demostrar que los protistas distan de representar solo un 3 por ciento de la diversidad eucariótica. De hecho, constituyen más del 70 por ciento de las especies, cifra que crece cada año fren-

MÁS ESPECIES DE LAS QUE SE CREÍA: Los organismos eucariotas, según se describían con los métodos taxonómicos tradicionales, estaban formados por tres grandes grupos (hongos, animales y plantas) y un reducido número de especies unicelulares, los protistas (*izquierda*). Pero los modernos análisis masivos de códigos de barras de ADN han revelado, contra todo pronóstico, que los protistas son los auténticos reyes de la diversidad eucariótica, con un número mucho mayor de especies que todas las animales, vegetales y fúngicas juntas (*derecha*).





te al menguante 30 por ciento que suponen los animales, las plantas y los hongos.

Pero, aunque el análisis masivo de códigos de barras genéticos ha logrado revelar la existencia de los protistas, no sabemos cómo son en su mayor parte ni qué importancia ecológica y evolutiva tienen. De ello se desprende que nuestro conocimiento sobre la diversidad eucariota está sesgado, ignoramos su magnitud real. Tal es ese desconocimiento que incluso existen dudas de que sepamos con exactitud qué significa ser un organismo eucariota.

MÁS ALLÁ DE LA BIODIVERSIDAD

El problema no es baladí. Los protistas no solo representan la mayor parte de la biodiversidad eucariota; también forman parte de la importantísima vida microbiana del planeta. Junto con las bacterias y las arqueas, son una pieza clave que han hecho posible la vida tal y como la conocemos. Algunas de sus funciones esenciales son regular los ciclos del carbono o constituir la base alimentaria de numerosos ecosistemas.

Pero su impacto va más allá. Numerosas pruebas indican que esta gran diversidad desconocida puede albergar la solución de algunos de los problemas que acucian hoy a nuestra sociedad y que seguirán haciéndolo en el futuro. Los protistas podrían ofrecernos nuevas fuentes de alimentos de producción más eficiente y menos contaminante que las actuales. O ser una fuente de combustibles alternativos, como el biocombustible de algas, que nos ayuden a atenuar los efectos del cambio climático y a cubrir la exponencial demanda energética. Finalmente, igual que la penicilina se descubrió a partir de un hongo, los protistas podrían permitir el desarrollo de nuevos fármacos o biomoléculas de interés tecnológico.

Dada la importancia de esta diversidad desconocida, podría pensarse que se están dedicando numerosos esfuerzos para desenmascararla. Lamentablemente, no es así. Los protistas no reciben la atención que merecen. El pasado marzo, el renombrado entomólogo Edward O. Wilson publicó en *The New York Times* el artículo «The 8 million species we don't know» («Los ocho millones de especies que no conocemos») y mencionó los protistas solo de forma testimonial. Y en otro artículo publicado el mismo mes en *The Guardian*, titulado «What is biodiversity and why does it matter to us?» («¿Qué es la biodiversidad y cómo nos afecta?»), ni siquiera se mencionan. Por desgracia, esta tendencia se retroalimenta. Dado que el estudio de cualquier cuestión depende de los recursos invertidos en ella, el progreso en este campo está destinado a ser exasperadamente lento, lo que nos lleva a preguntarnos: ¿llegaremos a conocer la diversidad real del planeta?

Si bien este es un tema complejo que incluye otros debates (como la discusión de si la transferencia de conocimiento se hace de manera eficaz o si es justo el sistema actual de financiación y publicaciones), hay un factor subyacente que condiciona a todos ellos: estamos inevitablemente sesgados, empujados por un antropocentrismo inherente a estudiar e invertir recursos sobre todo en aquello que, para bien o para mal, nos afecta de manera directa.

Con este artículo pretendemos poner de relieve el sesgo que existe hoy en el estudio de la biodiversidad, que impide su avance, y abogamos por un cambio de paradigma científico que nos permita ver por encima de nuestro antropocentrismo. De ello podría depender no solo descubrir con quién compartimos el planeta, sino también asegurar nuestra propia supervivencia y la de los ecosistemas que nos acogen. IyC

PARA SABER MÁS

CBOL Protist Working Group: Barcoding eukaryotic richness beyond the animal, plant, and fungal kingdoms. Jan Pawlowski et al. en *PLoS Biology*, vol. 10, n.º 11: e1001419, noviembre de 2012.

The others: Our biased perspective of eukaryotic genomics. Javier del Campo et al. en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 29, n.º 5, págs. 252-259, abril de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

El código de barras de la vida. Mark Y. Stoeckle y Paul D. N. Hebert en *IyC*, diciembre de 2008.

El plancton versátil. Aditee Mitra en *IyC*, junio de 2018.



LA ESPINOSA ENVOLTURA PROTEICA del virus de la rabia le permite pasar de una neurona a otra (*imagen ampliada alrededor de un millón de veces*).

NEUROCIENCIA

RABIA EN EL CEREBRO

Virus de la rabia genomanipulados permiten cartografiar con una precisión insólita los circuitos cerebrales

Andrew J. Murray


Andrew J. Murray es neurocientífico del Centro Wellcome Sainsbury de Circuitos Neuronales y Comportamiento, en Londres. Su grupo estudia cómo generan movimientos los circuitos nerviosos.



A*VANZADA LA NOCHE, EN AQUEL PÁRAMO inglés iluminado por la luna, una visión espeluznante dejó paralizados a los tres juerguistas: «una criatura espantosa, una enorme bestia negra, de la forma de un dogo, pero muchísimo mayor, como jamás se ha visto en el mundo. Ante sus miradas, aquella bestia, que se diría salida del infierno, arrancó a pedazos la garganta de Hugo Baskerville. Tal fue el pavor cuando volvió hacia ellos los ojos llameantes y las quijadas ensangrentadas, que volvieron grupas como alma que lleva el diablo lanzando gritos desesperados». Los historiadores de la medicina atribuyen el terror que* El perro de los Baskerville *infundió en los lectores de Arthur C. Doyle al profundo impacto que la rabia ejercía en la conciencia colectiva de la época. Capaz de transformar a la mascota más plácida en una bestia furiosa que echa espuma por la boca y causante de una mortalidad rayana en el cien por cien, el virus de la rabia ha sido uno de los azotes más temidos de la humanidad.*

Ya en 1804, los experimentos del médico alemán Georg Gottfried Zinke revelaron que el virus se acumulaba en la saliva del animal infectado. A medida que se multiplica en la boca, estimula la secreción de saliva, lo que explica por qué babean los perros rabiosos. Louis Pasteur descubrió hacia 1880 que invade el encéfalo. Ninguno de estos hallazgos es casual. Dos siglos de investigación han demostrado que el virus aúna la propagación desde las fauces babeantes del animal con la perversa facultad de incitarlo a morder con frenesí. En una proeza evolutiva, la enfermedad manipula el cerebro del hospedador para asegurar el contagio.

La rabia mata todavía hoy a más de 59.000 personas cada año, pero gracias a las campañas masivas de vacunación y a la cuarentena de los animales infectados, ya no desata el pánico de antaño en los países desarrollados. Es más, los neurocientíficos están convirtiendo este pernicioso microbio en un benefactor para la humanidad. El virus de la rabia se propaga con sigilo desde la mordedura hasta el cerebro: salta furtivamente de neurona en neurona burlando así el sistema inmunitario. Diversos investigadores, entre ellos los de mi grupo, se han servido de esa capacidad para visualizar las conexiones entre las neuronas.

El encéfalo humano alberga miles de millones de tales células, cada una conectada a otras miles; cartografiar esa maraña es esencial para saber cómo se generan las emociones y los comportamientos. Mediante variedades genomanipuladas del virus de la rabia, ahora es posible observar qué clase de impulsos recibe un tipo de neurona, cómo se propagan las señales eléctricas desde el ojo hasta el cerebro y qué neuronas controlan la postura para no caernos. Se trata de un campo apenas explorado, pero esta información permitirá en el futuro conocer mejor diversos trastornos neurológicos, como la enfermedad de Parkinson, y quizás encontrar remedios.

DE LA MORDEDURA AL ENCÉFALO

En primer lugar, la mordedura inyecta viriones (partículas víricas) en el tejido muscular. El virión de la rabia, una cápsula con forma de bala que contiene una sola hebra de ARN y proteínas, está erizado de glucoproteínas. Este revestimiento engaña a las neuronas motoras, que envían proyecciones al foco de entrada por las que el patógeno penetra en su interior. Las motoneuronas son las encargadas de segregar las sustancias que estimulan la contracción muscular y permanecen unidas a través de una larga cadena neuronal con el cerebro de la víctima, el destino final del virus.

En concreto, la glucoproteína vírica se une a un receptor ubicado en el botón o terminación sináptica de la neurona (punto desde donde las señales se transmiten a la neurona vecina). A semejanza de la puerta de la zona de seguridad del aeropuerto, por la que se puede salir pero no entrar, el botón protege el paso unidireccional, la sinapsis. Por convención, la dirección «a favor de la corriente» (anterógrada) de la sinapsis designa el tráfico de señales que de neurona en neurona viaja desde el encéfalo hasta los músculos. En cambio, el virus de la rabia se desplaza en sentido retrógrado o «a contracorriente» porque su meta es el órgano pensante. Así pues, engaña al receptor para entrar en la motoneurona por la puerta de salida.

Los virus destacan por saber manipular las células del hospedador para que sirvan a sus propios fines, pero pocos superan en destreza al de la rabia. Una vez dentro, el intruso se desprende de su disfraz de glucoproteínas y su ARN comienza a adueñarse de los materiales y del metabolismo de la célula para fabricar copias de sí mismo, así como de todas sus proteínas. Estos componentes se ensamblan después para originar los viriones hijos. Mientras que muchas especies de virus se replican con tal rapidez que la célula infectada acaba reventando y liberando los viriones al espacio intercelular, el virus de la rabia regula estrictamente su multiplicación con objeto de crear únicamente los viriones necesarios para seguir su camino. De ese modo, evita causar daños importantes que alertarían al sistema inmunitario. Deja intacta la célula hospedadora y atraviesa la sinapsis a contracorriente para pasar a una nueva neurona. Ese sigilo es uno de los motivos por los que el período de incubación de la enfermedad es sumamente largo y asintomático, por lo común de uno a tres meses en el ser humano.

EN SÍNTESIS

El virus de la rabia se las ingenia para ir saltando de una neurona a otra en su camino desde la mordedura hasta el cerebro, su meta final.

Virólogos y neurocientíficos han aprovechado esa facultad para identificar las neuronas que envían señales a aquellas que son objeto de estudio.

El método consiste en modificar genéticamente el virus para que emita luz, infecte solo las neuronas de interés y salte una sola conexión neuronal.

PÁGINAS ANTERIORES: CHRIS BJORNBERG, SCIENCE SOURCE

Tras el salto a la nueva neurona, el virión reinicia todo el proceso: se despoja de la cubierta, se copia a sí mismo y los viriones nacientes se ensamblan para pasar a la siguiente neurona en sentido retrógrado. De esta manera, el virus de la rabia traza su camino a través del sistema nervioso, ascendiendo desde la primera motoneurona que le sale al paso en el tejido muscular, a lo largo de la médula espinal hasta el encéfalo.

En los primeros años del presente milenio, varios grupos de investigación, como el de Gabriella Ugolini, ahora en el Instituto de Neurociencias París-Saclay, y el de Peter Strick, hoy en la Universidad de Pittsburgh, pretendían usar el virus como marcador de los circuitos neuronales. No obstante, descifrar la ruta tomada por el patógeno desde el músculo hasta el encéfalo no era sencillo. Al examinar una instantánea de las neuronas infectadas, ¿cómo distinguir entre su primer salto de una neurona a otra y los sucesivos?

En un principio, el problema se resolvía sacrificando los animales de laboratorio poco después de la infección, por lo que solo se le daba tiempo a que se diseminara por una o dos sinapsis. Este proceder reveló algunas de las principales vías encefálicas que intervienen en el control motor, pero tenía sus inconvenientes. No todas las conexiones entre las neuronas son iguales. Una sinapsis puede ser fuerte (o débil), con lo que será más (o menos) probable que la señal que se desplaza a través de ella active la neurona de interés en respuesta. Otra podría estar situada cerca del soma neuronal o, en cambio, alejada, en el extremo de una prolongación. Y algunas neuronas entablan un único vínculo con una anterógrada, mientras que otras crean cientos de ellos. Debido a esa heterogeneidad, el tiempo que tarda el virus en pasar de una neurona a otra varía, lo que añade un factor de incertidumbre. ¿Qué sucede si se desplaza por dos o tres sinapsis fuertes antes de pasar por una débil?

INGENIERÍA VÍRICA

Para soslayar este problema, fue necesario modificar el virus de la rabia. Los biólogos moleculares han desarrollado la asombrosa facultad de manipular el ADN: remplazar genes es ya tan habitual como hacer café en la cocina del laboratorio. Ahora bien, el virus de la rabia natural no tiene ADN que manipular, solo ARN. Este obstáculo se superó con la aparición de la genética inversa, que produce ARN a partir de ADN, invirtiendo el ciclo genético normal. En 1994, Matthias Schnell y Karl-Klaus Conzelmann, ambos entonces en el Centro Federal de Investigación de Enfermedades Víricas de Animales en Tubinga, Alemania, produjeron en el laboratorio un virus de la rabia funcional, exclusivamente a base de ADN clonado. Incluso alteraron su genoma, es decir, la cadena de ARN que codifica sus atributos característicos.

La posibilidad de manipular con celeridad el genoma permitió conocer mejor la participación de los diversos genes rábicos en las habilidades del virus. Un solo gen era imprescindible para que avanzara por las neuronas, que resultó ser el que codifica la glucoproteína. Al eliminarlo del genoma, el virus podía infectar una célula, pero, una vez en su seno, quedaba detenido. Este descubrimiento lo catapultó al ámbito general de las neurociencias.

En 2007, la colaboración entre los neurocientíficos Ian Wickersham y Edward Callaway, entonces en el Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California, y los virólogos Conzelmann y Stefan Finke, del Instituto Friedrich Loeffler de Alemania, dio como fruto un ingenioso sistema para cartografiar los circuitos neuronales. Como primer paso de su esquema, se sustituía el gen de la glucoproteína en el genoma rábico por otro que codificaba una proteína fluorescente. El virión genomodificado no podía fabricar las glucoproteínas, sino que su ARN elaboraba copias de la proteína fluorescente (junto con todas las demás proteínas rábicas), de modo que las células infectadas se iluminaban con un color brillante elegido por los investigadores.

El segundo paso consistía en aportar la glucoproteína a la neurona en estudio mediante otro mecanismo genético. De esa manera, los viriones hijos podrían envolverse con ella y saltar una vez, no más. Con ese fin se recurrió a otro virus muy sencillo, llamado adenoasociado (VAA) porque suele acompañar a los adenovirus, mucho más grandes. Los VAA contienen una ínfima cantidad de ADN; los investigadores del Instituto Salk insertaron en ese ADN un gen que codifica la glucoproteína rábica. El virión de la rabia podía valerse de esa glucoproteína para saltar una sola sinapsis, pero no podía llevar consigo el gen codificante, por ser un fragmento de ADN, no de ARN. Y tras saltar a la siguiente neurona, el patógeno quedaba encerrado de nuevo. En ese momento, el encéfalo del animal infectado mostraba poblaciones de células iluminadas en el seno del sistema nervioso, conectadas directamente con la neurona que se deseaba estudiar.

Quedaba un problema por resolver. La inyección del virus en el encéfalo ocasionaba la infección directa de cualquier neurona cuyas proyecciones radicaran en el punto de inyección. Sin un modo de limitar la infección inicial a neuronas concretas, no era posible distinguir las infectadas directamente por el virus inyectado de las que resultaban infectadas después de que este atravesase la sinapsis. La solución provino de otro campo de la virología: los virus propios de las aves.

En la naturaleza existen familias enteras de virus que infectan exclusivamente ciertos grupos zoológicos. Por ejemplo, el virus de la leucosis-sarcoma aviar (VSLA) suele causar cáncer en los pollos, pero en condiciones normales no infecta las células de mamífero. Al igual que el de la rabia, posee una envoltura de glucoproteínas, que adopta diferentes configuraciones. Las distintas glucoproteínas del VSLA se denominan Env (de envoltura), más un distintivo de la forma en cuestión. Cada subtipo se une a un receptor específico. Así, por citar uno, la forma EnvA se une al receptor TVA (receptor A del virus tumoral aviar). Si una célula carece de ese receptor, no puede ser infectada por un virus recubierto con EnvA. Esa interacción selectiva nos permite limitar la infección inicial por el virus de la rabia a un tipo de neurona.

Mediante la introducción del gen de la glucoproteína EnvA en un cultivo celular infectado por el virus de la rabia (en un proceso llamado pseudotipado), Wickersham, Callaway y sus colaboradores remplazaron su cubierta glucoproteínica natural por la glucoproteína EnvA del virus aviar. Con esta modificación, el virus no podía engañar a las células de mamífero para penetrar en su interior. Al dotar del receptor TVA a la neurona de interés, por lo común en cerebro de ratón, se garantizaba que el virus de la rabia infectara solo esa célula.

La neurona en estudio (en la práctica, una clase de neuronas) recibía también un VAA con el gen de la glucoproteína rábica. Después de penetrar, el virus de la rabia se despojaba de su disfraz de ave, se cubría con su manto normal y saltaba a las neuronas en sentido retrógrado. Con la manipulación genética del virus para infectar a un grupo concreto de neuronas «iniciadoras», y saltar desde ellas una sola vez, ya era posible conseguir una imagen clara de las conexiones del encéfalo.

PERFECCIONAMIENTO DEL SISTEMA

La simplicidad y la elegancia del sistema rábico delta-G (nombre dado por sus inventores por la glucoproteína modificada) con-

Trazado de circuitos cerebrales con el virus de la rabia

El virus se abre paso hasta el encéfalo desde la mordedura saltando de una neurona a otra. Virólogos y neurocientíficos han aprovechado y modificado esa facultad para ver cómo se conectan las neuronas en circuitos complejos.

MECANISMO PATÓGENO NORMAL

El virión (partícula vírica) de la rabia posee una envoltura de glucoproteínas que engaña a la neurona motora cercana para que le deje entrar 1. Penetra a través de una terminal sináptica, una puerta por la que en condiciones normales transita información hacia otras neuronas. Una vez dentro, se desprende de la cubierta para liberar su genoma, que es de ARN, no de ADN 2. El ARN se adueña del aparato metabólico de la neurona para producir múltiples copias de sí mismo y de las proteínas esenciales del virus 3. Las proteínas y las hebras de ARN se ensamblan formando viriones hijos 4 que se desplazan a contracorriente por las neuronas conectadas 5. De esta manera, el virus pasa de una neurona a otra camino del encéfalo, donde continúa su diseminación 6.

Puerta de entrada de la infección

MODIFICACIÓN 1: MANIPULACIÓN GENÉTICA DEL ARN RÁBICO

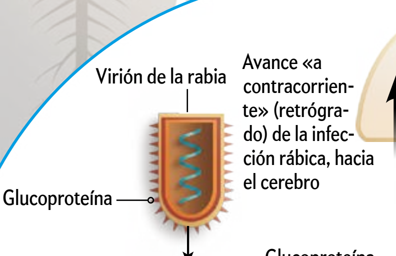
Para seguir la ruta exacta del virus, los científicos sustituyeron en su ARN el gen de la glucoproteína por el de una proteína fluorescente. El ARN modificado producía una proteína brillante, de modo que la neurona infectada se iluminaba, pero no podía fabricar la glucoproteína. Por consiguiente, el virus era incapaz de infectar la siguiente neurona. A continuación, se incorporó a la neurona de interés un virus inofensivo (virus adenoasociado o VAA) a cuyo ADN se le había añadido el gen de la glucoproteína rábica. Así ya era posible fabricar la glucoproteína, que los viriones podían emplear una sola vez para saltar a otra neurona.

MODIFICACIÓN 2: ALTERACIÓN DE LA CUBIERTA GLUCOPROTEÍNICA

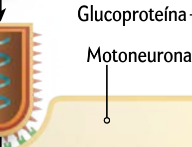
Con el fin de limitar la infección rábica a las neuronas de interés, se aprovechó la existencia de variantes de la glucoproteína. Las envolturas glucoproteínicas de ciertos virus aviares no pueden penetrar normalmente en las células de mamífero. Por tanto, si la glucoproteína del virus de la rabia se remplaza por la de un virus aviar, se impide que infecte a ratones, por ejemplo. En los ratones de laboratorio, solo se dotó a las neuronas de interés de la puerta que permite la entrada de las glucoproteínas aviares. El virus modificado marcó únicamente las neuronas de interés, así como aquellas de las que estas recibieron las señales.

6 En el encéfalo, los viriones se propagan de una neurona a otra

Diana de la modificación 2: neurona de interés



Neurona



1 Unión y entrada

Receptor de la glucoproteína

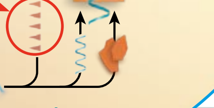
5 Infección de la neurona vecina



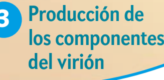
4 Ensamblaje del virión hijo

ARN

Diana de la modificación 1: glucoproteína



2 Desprendimiento de la cubierta



3 Producción de los componentes del virión

KELLY MURPHY

quistó a la comunidad de neurocientíficos. Permitía ver enseguida qué tipos de neuronas enviaban señales a las de interés. Pero, como todas las técnicas novedosas, tenía sus inconvenientes. En ocasiones, el número de conexiones marcadas era demasiado escaso, en torno a 10 por neurona inicial.

Hacia 2015, Thomas Reardon, Thomas Jessell, Attila Losonczy y yo mismo, todos entonces en la Universidad de Columbia, empleamos el sistema delta-G para conocer los circuitos neuronales que conducen las órdenes motoras. Al hallar un número relativamente bajo de conexiones con las motoneuronas de la médula espinal o del encéfalo, sospechamos que la imagen obtenida del circuito era incompleta. La neurotoxicidad entrañaba otra complicación. Cuando el virus se hallaba en una célula, esta comenzaba a degradarse y moría en un par de semanas. Si el propio virus alteraba el comportamiento de las neuronas, interpretar las observaciones resultaría problemático.

Pedimos ayuda a Schnell y Christoph Wirblich, en la Universidad Thomas Jefferson, por su trabajo innovador sobre la biología del virus de la rabia. Supieron de inmediato que nuestros problemas emanaban de la cepa vírica elegida. Y es que había sido concebida en origen para elaborar una vacuna antirrábica. Las vacunas incorporan cepas especiales, seleccionadas para multiplicarse con mayor rapidez que de costumbre, de forma que los innumerables viriones hijos destruyan las células infectadas, alertando al sistema inmunitario antes de que sea tarde. Ello nos indicó el camino para perfeccionar nuestro instrumento de investigación. Y como usábamos ratones, nuestros virólogos nos recomendaron probar una cepa que se había refinado durante muchos años para infectar neuronas de este roedor.

El virus original de esta cepa se había aislado en la naturaleza y luego se «recompuso» en el laboratorio mediante pases repetidos por encéfalo de ratón o por líneas celulares. Había sido desarrollado, por tanto, para especializarse en el sistema nervioso del ratón. Tras acoplar un marcador neuronal basado en esta cepa específica del ratón, observamos que revelaba muchas

más conexiones que los experimentos anteriores. Además, por su pericia en eludir el sistema inmunitario del roedor, fabricaba cantidades bastante pequeñas de cada proteína. En suma, la fabricación exigía menos esfuerzo a la maquinaria celular, por lo que las neuronas se mantenían relativamente sanas.

Modificamos a continuación nuestro sistema marcador, sustituyendo en el virus de la rabia el gen de la proteína fluorescente por el de una proteína sensible a la luz, la canalrodopsina (ChR), descubierta en algas verdes. Cuando una luz azul la activaba, esta molécula sorprendente abría un canal que permitía la entrada de iones positivos a la neurona de interés, que como efecto emitía una señal eléctrica. (Nuestra versión de la ChR incluía una proteína fluorescente, por lo que la célula infectada seguía brillando.) Con este refinamiento del virus, pudimos ver la estimulación de circuitos neuronales completos durante ciertas acciones del ratón, así como activarlos o desactivarlos hasta un mes después de que hubiera infectado la neurona. De esta suerte, tuvimos tiempo de sobra para llevar a cabo muchas de las pruebas precisas para averiguar el modo en que ciertos circuitos generan comportamientos.

DIAGRAMA DEL CABLEADO

Diversas versiones del sistema rábico delta-G han permitido examinar numerosos circuitos del sistema nervioso y conocer cómo intervienen en las percepciones y los comportamientos de los animales. Tomemos como ejemplo el aparato visual. Cuando la luz penetra en el ojo, las células ganglionares de la retina, unas neuronas situadas en su parte posterior, transmiten señales al cerebro. Se pensaba que esta información discurría por estaciones intermedias del encéfalo hasta terminar en la corteza cerebral (la famosa sustancia gris), donde era procesada. El grupo de Botond Roska, del Instituto Friedrich Miescher de Investigación Biomédica, en Suiza, se sirvió del sistema rábico para seguir las señales desde las células ganglionares retinianas hasta el cuerpo geniculado lateral, una zona del cerebro que se consideraba una simple estación de relevo más de camino a la corteza.

Este equipo demostró que el cuerpo geniculado lateral contiene tres tipos de neuronas, que probablemente procesan la información visual de modo distinto. En realidad, menos de un tercio de ellas actúan como relevo en una línea directa desde la retina hasta la corteza cerebral. Alrededor de otro tercio recoge combinaciones de distintos impulsos de un ojo, mientras que las neuronas restantes (en torno al 40 por ciento) reciben señales de ambos ojos. Por tanto, pese a la cercanía del cuerpo geniculado lateral al inicio del circuito visual, la mayoría de sus neuronas integran información de varias fuentes. Es de esperar que este hallazgo esclarezca el proceso con el que el cerebro interpreta la información ocular.

En Columbia, mis colaboradores y yo estudiamos las neuronas del núcleo vestibular lateral, una región encefálica que trata de evitar las caídas. Imaginemos un convoy de metro que frene de repente; el viajero, sin tiempo para pensar, moverá los pies para compensar, tensará las piernas y, tal vez, se aferrará a la barra más cercana. ¿Cómo activa el cerebro todos los músculos oportunos con semejante rapidez en situaciones similares?

Vimos que el núcleo vestibular lateral del ratón acoge dos tipos de neuronas anatómicamente diferenciadas que proyectan distintas conexiones anterógradas a otras partes del sistema nervioso. Un grupo se activa casi de inmediato cuando el cerebro percibe la inestabilidad del cuerpo; actúan para extender las extremidades con el fin de ampliar la base de apoyo. Después entra en acción un segundo grupo del núcleo, que ordena tensar y estabilizar las articulaciones del mismo miembro, de manera que el cuerpo pueda retornar a su posición inicial. Para activar en el laboratorio estas últimas, solo había que encender una luz azul, transmitida al citado núcleo a través de un cable de fibra óptica. Al aplicar la luz, el ratón movía las patas, para no caer, aunque no estuviera perdiendo el equilibrio.

El laboratorio de Nao Uchida en la Universidad Harvard investigó una tercera cuestión importante: ¿qué funciones desempeñan las neuronas que liberan la dopamina? Es bien sabido desde hace tiempo que las neuronas dopaminérgicas de dos regiones del encéfalo, la sustancia negra compacta y el área tegmentaria ventral, responden a las recompensas. Devienen muy activas cuando un animal de experimentación recibe un premio o si un estímulo sensorial predice que está a punto de obtenerlo. (Situaciones análogas a comer una chocolatina y oír el crujido del envoltorio.) Para desentrañar qué tipos de información recibían las neuronas, era preciso conocer cómo se conectaban a otros circuitos cerebrales. Gracias al sistema delta-G, el equipo de Harvard halló que las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra compacta recogían información sobre la pertinencia de un estímulo: ¿me va a reportar un trozo de chocolate ese sonido de envoltorio de chocolatina? En cambio, al área tegmentaria ventral llegaba información sobre la calidad de la recompensa: ¿está rica la chocolatina?

En la enfermedad de Parkinson, las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra compacta degeneran. Curiosamente, Uchida y su equipo también descubrieron que las principales señales de entrada a esas neuronas proceden del núcleo subtalámico, una pequeña región lentiforme que, junto con otros núcleos similares, interviene en el control del movimiento. La estimulación del núcleo por medio de un electrodo inserto, conocida como estimulación cerebral profunda, suele paliar el parkinsonismo. Los descubridores de esas señales de entrada supusieron que eran la explicación de la eficacia de la técnica y pensaron que actuar sobre otras regiones que envían señales a la sustancia negra compacta ayudaría a algunos pacientes.

La combinación de la evolución natural con ciertas modificaciones genéticas nos ha dotado de una herramienta sumamente potente. Sin embargo, aún hay grandes posibilidades de mejora. Por citar algunas: ¿será posible genomanipular virus para que viajen en sentido anterógrado, de modo que revelen las señales de salida de las neuronas en lugar de las de entrada? ¿Se podrá crear uno que solo marque las conexiones activas y que, por tanto, ilumine los circuitos involucrados en cada comportamiento? Ha llegado el momento de manipular en provecho de la humanidad un virus que se ha servido de nosotros y nos ha aterrorizado durante milenios. IyC

PARA SABER MÁS

Monosynaptic restriction of transsynaptic tracing from single, genetically targeted neurons. Ian R. Wickersham et al. en *Neuron*, vol. 53, n.º 5, páginas 639-647, 1 de marzo de 2007.

Whole-brain mapping of direct inputs to midbrain dopamine neurons. Mitsuko Watabe-Uchida et al. en *Neuron*, vol. 74, n.º 5, páginas 858-873, 7 de junio de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Células de la glía. R. Douglas Field en *IyC*, junio de 2004.

¿Se puede curar la rabia? Rodney E. Willoughby en *IyC*, junio de 2007.

HISTORIA DE LA CIENCIA

Cien años del teorema de Noether

Figura dominante de la escuela alemana de álgebra, la matemática Emmy Noether sentó una de las piedras angulares de la física teórica moderna al demostrar la relación entre simetrías y cargas conservadas

David E. Rowe



RETRATO de Emmy Noether en una fotografía anterior a 1910.

David E. Rowe es profesor emérito de historia de la ciencia en la Universidad Johannes Gutenberg, en Maguncia.



En 1918, hace ahora cien años, la matemática alemana Emmy Noether publicó un artículo titulado *Invariante Variationsprobleme* («Problemas variacionales invariantes»). Hoy, ese trabajo y los teoremas que la autora demostró en él se consideran uno de los grandes hitos en el desarrollo de la física teórica del siglo XX. Sin embargo, aquellos logros solo se harían célebres de manera póstuma. Su condición de mujer y la modesta opinión que ella misma tenía de sus propios resultados son solo dos de las razones que explican esta circunstancia.

Tanto en vida como hasta mucho después de su muerte, acaecida en 1935, Noether tuvo su nombre asociado exclusivamente al papel determinante que, en los años veinte, desempeñó en el desarrollo del álgebra abstracta moderna. En parte debido a su influencia y prestigio como algebrista, pocos supieron ver que Noether elucidó algunas sombras matemáticas de la teoría de la relatividad general de Einstein; en particular, las referentes a las leyes de conservación.

Con todo, es necesario enfatizar que el teorema principal demostrado por Noether hacía gala de una gran generalidad: trataba tanto de la mecánica clásica como de las teorías de campos, de las cuales el electromagnetismo o la relatividad general no son más que ejemplos particulares. De hecho, el teorema de Noether proporciona una profunda visión sobre las leyes de conservación en casi cualquier sistema físico, al relacionarlas estrechamente con sus simetrías, o «invariancias».

Entre las aplicaciones de este teorema clave encontramos las conocidas leyes de conservación de la cantidad de movimiento, el momento angular y la energía. Así, el teorema de Noether implica que la conservación de la cantidad de movimiento total de un sistema físico aislado se debe a la simetría frente a traslaciones espaciales; es decir, al hecho de que las ecuaciones que describen la dinámica del sistema permanecen invariantes cuando este se traslada (cuando cambiamos el origen del sistema de coordenadas o, de manera equivalente, cuando modificamos la posición del sistema). De igual modo, la conservación del momento angular obedece a la simetría frente a rotaciones, y la conservación de la energía surge como consecuencia de la simetría frente a traslaciones en el tiempo.

Hoy, el teorema de Noether ocupa un lugar prominente en todos los libros de texto de física moderna. Sin embargo, como ha señalado la matemática de la Escuela Politécnica de Francia Yvette Kosmann-Schwarzbach en su libro de 2006 *Les théorèmes de Noether* (una referencia sobre el tema), los físicos tardaron un tiempo en apreciar su importancia. E incluso hoy, pocas veces se hace hincapié en el hecho de que el artículo original de Noether contenía no solo uno, sino dos teoremas fundamentales. De hecho, ambos resultan esenciales para entender la motivación original de su trabajo; a saber, la distinción entre lo que Noether llamó leyes de conservación «limpias» e «impropias». Tales investigaciones se desarrollaron en el contexto de complejas discusiones sobre la conservación de la energía

EN SÍNTESIS

Emmy Noether fue una brillante matemática alemana de principios del siglo XX. Una de las madres del álgebra moderna, en 1918 demostró dos teoremas que acabarían convirtiéndose en una de las bases de la física teórica moderna.

Dichos teoremas relacionaban las simetrías de un sistema físico con sus leyes de conservación. Gracias a ellos, principios fundamentales como la conservación de la energía o el momento pasaron a entenderse como consecuencia de simetrías.

Sin embargo, la fama de Noether como algebrista y otras circunstancias causaron que el verdadero reconocimiento por aquellos trabajos solo le llegara de forma póstuma. En vida, su condición de mujer le supuso asimismo numerosos obstáculos.

Los teoremas de Noether fueron el resultado de sus investigaciones para aclarar ciertas cuestiones de la teoría de la relatividad general. Hoy, las simetrías constituyen una guía fundamental en la construcción de toda teoría física.

en la relatividad general, un marco que describiremos brevemente a aquí.

OBSTÁCULOS PERSONALES

Emmy Noether fue una matemática cuya capacidad y genialidad tardaron largo tiempo en ser reconocidas. Varios factores personales explican en parte esta circunstancia. Nacida en 1882 en la pequeña ciudad de Erlangen, al norte de Baviera, Emmy fue conocida durante largo tiempo simplemente como la hija de Max Noether, un prominente geómetra algebraico. La familia pertenecía a la élite intelectual judía de Alemania, y las matemáticas constituían uno de los pocos campos académicos donde los varones judíos tenían una oportunidad real de conseguir trabajo como profesor universitario. Fritz, el hermano menor de Emmy, se convirtió en un reconocido profesor de matemática aplicada en Karlsruhe y Breslavia.

Entre 1900 y 1902, Emmy fue autorizada a asistir en calidad de oyente a los cursos de matemáticas y lenguas modernas impartidos en la universidad donde trabajaba su padre. Fue una de las dos únicas mujeres que frecuentaron las clases, concurridas por 984 hombres. Hubo que esperar hasta 1903 para que Baviera abriera las puertas de sus universidades a las mujeres (las universidades prusianas harían lo propio en 1908). Emmy optó por las matemáticas y recibió clases de su padre y de su colega Paul Gordan. Tras pasar un semestre en Erlangen se trasladó a Gotinga, por entonces en Prusia, donde asistió a los cursos impartidos por David Hilbert, Felix Klein, Hermann Minkowski, Otto Blumenthal y Karl Schwarzschild. Pero después cayó enferma y regresó a su tranquila ciudad natal, donde en 1907 obtuvo el doctorado con la mención *summa cum laude*.

Emmy realizó su tesis bajo la dirección de Gordan, conocido por sus coetáneos como «el rey de la teoría de los invariantes». Gordan fue un gran especialista en cálculos algebraicos complejos y, como era de esperar, la tesis de Noether —que ella menospreciaría más adelante, al considerarla un trabajo juvenil inmaduro— demostró su destreza para lidiar con tales cómputos. De hecho, la «madre del álgebra moderna» fue una calculadora de primera línea, aunque finalmente sería su enfoque conceptual lo que la haría famosa.

Durante los siguientes ocho años, Noether continuó madurando como matemática, sobre todo bajo la influencia del sucesor de Gordan, Ernst Fischer. Finalmente, escapó de su aislamiento a principios de la Primera Guerra Mundial, cuando las aulas universitarias comenzaron a vaciarse a medida que se llenaban las trincheras [*véase* «Guerra, mujeres y ciencia», por Patricia Fara; Investigación y Ciencia, agosto de 2018]. En el departamento de matemáticas de la Universidad de Gotinga, Hilbert y Klein siempre estaban buscando nuevos talentos. En la primavera de 1915, invitaron a Noether a unirse a ellos.

La oferta probablemente se produjo con la seguridad de que la facultad de filosofía de Gotinga apoyaría su candidatura para la habilitación, una cualificación necesaria para poder ejercer la docencia. Sin embargo, ni siquiera el apoyo de personalidades tan influyentes como Hilbert y Klein bastó para garantizarlo. De

INVARIANTES EN MATEMÁTICAS Y FÍSICA

Cantidades independientes de las coordenadas

La teoría clásica de invariantes guarda estrechos vínculos con la geometría proyectiva analítica, una rama de las matemáticas que estudia aquellas propiedades de las figuras geométricas que permanecen invariantes bajo transformaciones lineales de las coordenadas. Un ejemplo sencillo nos lo proporcionan las curvas algebraicas de segundo grado, dadas por el conjunto de puntos (x, y) del plano que satisfacen una relación de la forma

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0\,,$$

donde a, b, c, d, e y f son constantes.

En términos geométricos, tales curvas son cónicas (intersecciones de un plano con un cono), y las cantidades $a+c$ y $ac-b^2$ son invariantes frente a la elección de las coordenadas. Salvo en casos particulares, la curva será una elipse o una hipérbola, de modo que su ecuación puede reescribirse como

$$\frac{x^2}{p^2} \pm \frac{y^2}{q^2} = 1\,,$$

donde el signo ± permite distinguir el tipo de cónica. Puede demostrarse con facilidad que

$$a + c = \frac{1}{p^2} \pm \frac{1}{q^2}\,,$$

$$ac - b^2 = \pm\frac{1}{p^2q^2}\,.$$

Los invariantes aparecen también con frecuencia en física. Un ejemplo elemental lo hallamos en los vectores. En general, un vector queda caracterizado por una dirección y una magnitud. En un sistema de coordenadas concreto, un vector $\mathbf{v}_1$ con componentes dadas por

$$\mathbf{v}_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

tendrá una magnitud, o «módulo», igual a

$$|\mathbf{v}_1| = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}\,.$$

Esta cantidad es invariante frente a traslaciones y rotaciones del sistema de coordenadas: aunque al efectuar tales transformaciones las componentes explícitas del vector sí cambiarán, su módulo seguirá siendo el mismo en todos los casos.

Dados dos vectores $\mathbf{v}_1$ y $\mathbf{v}_2$, podemos construir tres cantidades que permanecerán invariantes bajo el mismo tipo de transformaciones: el módulo de cada vector y su producto escalar, dado por

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2\,.$$

En física relativista, los invariantes fundamentales implican una cuarta coordenada: el tiempo, afectada por un signo diferente al de las tres coordenadas espaciales. Para un vector de componentes (x, y, z, t), su magnitud invariante puede expresarse como

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2}\,,$$

donde c representa la velocidad de la luz en el vacío.

En la teoría de la relatividad especial, las cantidades invariantes lo son frente a un grupo concreto de transformaciones de coordenadas conocido como «grupo de Lorentz». En relatividad general, en cambio, se consideran transformaciones arbitrarias de las coordenadas. Decimos por ello que las ecuaciones de campo de Einstein, las cuales gobiernan el comportamiento de la materia y de la luz en presencia de un campo gravitatorio, son «covariantes generales», ya que conservan la misma forma con independencia del sistema de coordenadas que elijamos para describir los fenómenos.



CALLE DE LA UNIVERSIDAD EN ERLANGEN, ciudad natal de Noether, en 1916. La matemática vivió en esta población durante la mayor parte de su vida hasta 1915, año en que se desplazó a la prestigiosa Universidad de Gotinga por invitación de David Hilbert y Felix Klein.

hecho, la habilitación de Noether no fue posible hasta después de la guerra, en el clima más liberal de la joven República de Weimar.

Ya en 1907 se debatía sobre la posibilidad de que las mujeres pudieran ejercer la docencia en las universidades prusianas, como la de Gotinga. Dado que los profesores se habían opuesto casi por unanimidad, el ministerio competente decidió mantener en la regulación de la habilitación la cláusula que excluía a las mujeres. Cuando, ocho años después, el caso de Emmy Noether llegó a la facultad de Gotinga, la sección de matemáticas y ciencias determinó por diez votos contra siete que se hiciese una excepción. Todos los miembros de la facultad participaron en una reunión que resultó turbulenta y en la que Hilbert se burló de sus oponentes al proclamar: «¡Somos una universidad, no un establecimiento de baños!».

Al final, sin embargo, el ministerio se negó a ceder. Hilbert se desplazó más tarde a Berlín para negociar y logró una concesión sustancial: desde el semestre de invierno de 1916-17, se le permitió anunciar cursos impartidos «por el Prof. Hilbert, con la ayuda de la Srta. Noether». Al final, solo ella dio las clases.

Otra figura prominente que apoyó a Noether fue Albert Einstein, quien mantenía buenos contactos con los matemáticos de Gotinga. Al igual que Klein y Hilbert, Einstein apreció claramente el talento de Noether. Después de leer su artículo de 1918, escribió a Hilbert: «Estoy impresionado de que sea posible considerar estas cuestiones desde un punto de vista tan general. No perjudicará a las tropas que regresen a Gotinga del campo de batalla asistir a las clases de la Srta. Noether. ¡Parece conocer muy bien estas cuestiones!».

LEYES DE CONSERVACIÓN

No fue hasta la primavera de 1915, poco después de la llegada de Noether a Gotinga, cuando Einstein impartió una serie de conferencias sobre la teoría general de la relatividad. Aquella visita tuvo lugar pocos meses antes de los espectaculares avances logrados por Einstein en noviembre del mismo año. Fue entonces cuando Hilbert y Einstein formularon, de manera independiente, las ecuaciones del campo gravitatorio que satisfacían

CÁLCULO VARIACIONAL EN MECÁNICA CLÁSICA

La física como un problema de optimización

El cálculo variacional fue desarrollado para resolver problemas de minimización o maximización de ciertas magnitudes que dependen de la trayectoria tomada por un sistema físico.

En 1696, el matemático suizo Jean Bernoulli planteó el siguiente problema: dados dos puntos en un plano vertical, encontrar la forma de la curva que haría que una masa que se deslizase por ella en caída libre y sin rozamiento llegase del punto más alto al más bajo en el menor tiempo posible. El propio Bernoulli resolvió este famoso problema apoyándose en una analogía óptica: el principio de Fermat, según el cual la luz avanza por un medio siguiendo siempre el camino más rápido. En el caso del movimiento de una masa en caída libre a lo largo de una curva dada, la solución resultó ser la cicloide hoy conocida como braquistócrona.

Más tarde, Leonhard Euler y Joseph-Louis Lagrange concibieron métodos variacionales para resolver problemas físicos. Estos se basan en la minimización de una cantidad denominada «acción», S, que en mecánica clásica viene dada por la integral en el tiempo de una magnitud conocida como lagrangiano, L:

$$S = \int L \, dt$$

En el caso de una partícula de masa m que se mueve en una dimensión, el lagrangiano puede expresarse como

$$L = T - V = \frac{1}{2} mv^2 - V(x) ,$$

donde T representa la energía cinética y V la energía potencial. Así pues, el lagrangiano puede depender tanto de la posición x de la partícula como de su velocidad, v (la derivada de la posición con respecto al tiempo).

Con esta formulación, las ecuaciones de movimiento del sistema pueden obtenerse imponiendo que la integral que define la acción S sea mínima, lo que implica restricciones para las trayectorias $x(t)$ que puede seguir la partícula. La formulación matemática de esta restricción conduce a las llamadas ecuaciones de Euler-Lagrange, las cuales son equivalentes a las obtenidas por aplicación directa de las leyes de Newton. Tales métodos, sin embargo, permitieron formalizar el principio de mínima acción, más tarde conocido como principio de Hamilton, y extenderlo a las teorías del campo electromagnético y de la relatividad general.



EMMY NOETHER Y FRITZ, uno de sus tres hermanos, en 1933. Ese año, tras la llegada de los nazis al poder, Emmy emigró a Estados Unidos. Murió allí dos años después, a raíz de las complicaciones surgidas tras una operación quirúrgica. También Fritz huyó de Alemania en 1933. Tras ocupar un cargo de profesor de matemáticas en Tomsk, en la Unión Soviética, fue arrestado en 1937 con cargos falsos de espionaje y ejecutado por el Gobierno de Stalin en 1941.



el principio de relatividad general, según el cual las leyes de la física debían mantener la misma forma con independencia del sistema de referencia, o de coordenadas, elegido para describir los fenómenos.

Los resultados de Einstein y Hilbert eran muy similares, aunque se guiaban por supuestos físicos y métodos matemáticos muy distintos. El enfoque desarrollado por Hilbert se basó en los métodos variacionales, los cuales habían desempeñado un importante papel en la mecánica clásica a partir de las contribuciones de Joseph-Louis Lagrange en el siglo XVIII.

Einstein también intentó un enfoque semejante, pero Hilbert fue el primero en explotar esa vía y derivar a partir de ella las ecuaciones totalmente covariantes de campo gravitatorio; es decir, ecuaciones que mantenían la misma forma con independencia del sistema de coordenadas adoptado. Hilbert notó también que su sistema de catorce ecuaciones satisfacía cuatro identidades, las cuales interpretó como un vínculo entre la gravedad y el electromagnetismo. Sin embargo, la verdadera naturaleza de dichas identidades no quedó clara hasta la publicación de los trabajos de Noether.

Aún más misterioso resultó lo que Hilbert llamó la «ecuación de la energía invariante», basada en una construcción compleja conocida como vector de energía de Hilbert. Noether comenzó a estudiar las propiedades de aquella magnitud un poco más tarde, a pesar de que no publicó nada al respecto. Lo que descubrió, sin embargo, se menciona en un intercambio epistolar entre Klein y Hilbert en enero de 1918 sobre la conservación de la energía en la relatividad general, publicado en un volumen (fechado en 1917) de la revista *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.

Klein señaló: «Como sabe, la Srta. Noether me aconseja continuamente en mi trabajo y, de hecho, es solo gracias a ella que he entendido estos asuntos». A raíz de este intercambio, fue Klein el que insistió en que la ecuación de la energía invariante de Hilbert constituía una identidad más general, y no una verdadera ley de conservación en el sentido de la mecánica clásica. Semejante ley clásica de conservación no podía alcanzarse sino invocando las propiedades físicas de la materia, mientras que la expresión de Hilbert surgía como resultado de las ecuaciones del campo gravitatorio y de consideraciones puramente formales. Klein apuntó también que Noether ya lo había hecho notar y que se había ocupado de los detalles en un manuscrito.

Hilbert respondió a Klein: «Estoy totalmente de acuerdo con el fondo de sus declaraciones sobre los teoremas de la energía. Emmy Noether, a quien pedí ayuda hace más de un año para aclarar este tipo de cuestión analítica a propósito de mi teorema de la energía, descubrió en ese momento [...] que las componentes de la energía que propuse —así como las de Einstein— podían transformarse formalmente en expresiones cuya divergencia es idénticamente nula». Traducido a términos más simples, lo anterior significa que la ley de conservación que Hilbert encontró para su «vector de energía» era el resultado de manipulaciones matemáticas puramente formales, y constituían por tanto una

LOS DOS TEOREMAS DE NOETHER

Simetrías y cantidades conservadas

Como señalaba la propia Emmy Noether al comienzo de su artículo de 1918, su enfoque combinaba métodos del cálculo variacional y de la teoría de Lie sobre ecuaciones diferenciales invariantes bajo transformaciones infinitesimales. En el siglo XIX, el matemático noruego Sophus Lie propuso un método para resolver ecuaciones diferenciales. Este se basaba en considerar transformaciones infinitesimales que, al aplicarlas sobre una solución, diesen como resultado otra solución de la ecuación original.

Inspirada por la teoría de Lie, Noether demostró un primer teorema que establecía que, para un sistema físico descrito por un lagrangiano, el número de magnitudes físicas conservadas era igual al número de simetrías; es decir, al número de variaciones infinitesimales independientes que dejasen invariante la acción (la integral del lagrangiano). Este primer teorema se refiere a grupos de transformaciones que dependen de un número finito de parámetros. Por ejemplo, el grupo de las rotaciones en el plano depende de un solo parámetro: el correspondiente al ángulo de rotación.

El segundo teorema de Noether, en cambio, se refería a transformaciones que dependían de funciones arbitrarias. Siguiendo a Lie, Noether llamó «grupos continuos finitos» a los del primer tipo y «grupos continuos infinitos» a los del segundo. Este segundo teorema implica que, por cada invariancia, o simetría, frente transformaciones de un grupo continuo infinito, aparece una relación entre las ecuaciones de Euler-Lagrange del sistema que hace que algunas de ellas dejen de ser independientes.

En el contexto de la relatividad general, este grupo infinito corresponde a las transformaciones que inducen cambios arbitrarios de coordenadas. Así pues, el segundo teorema de Noether permitió explicar las cuatro identidades halladas por Hilbert en las ecuaciones del campo gravitatorio. Noether subrayó que tales relaciones podían considerarse como leyes de conservación «impropias», no relacionadas con las leyes de conservación de la mecánica clásica o la relatividad especial.

El legado de Noether, hoy

Un siglo después, los resultados demostrados por Emmy Noether siguen siendo una herramienta insustituible para explorar las leyes fundamentales de la naturaleza

MIGUEL Á. VÁZQUEZ-MOZO

Hace cien años, la matemática alemana Emmy Noether publicó dos teoremas que acabarían ejerciendo un enorme impacto sobre el desarrollo de la física teórica. Hoy su importancia resulta casi imposible de exagerar: dichos teoremas constituyen una de las herramientas básicas que los físicos empleamos para analizar nuestras teorías e incluso para construir otras nuevas, tanto desde un punto de vista clásico como cuántico. ¿A qué se debe ese papel clave?

Los teoremas de Noether relacionan la existencia de simetrías con la de cantidades conservadas. En este sentido, son bien conocidas las aplicaciones de su primer teorema para deducir las leyes de conservación de la energía, el momento lineal y el momento angular. Estas aparecen como consecuencia de la invariancia (simetría) de las leyes físicas con respecto a las traslaciones en el espacio, las rotaciones o las traslaciones en el tiempo, respectivamente.

Sin embargo, las implicaciones de los teoremas de Noether van mucho más allá. Un aspecto mucho menos conocido es que dichos teoremas pueden aplicarse también a aquellas simetrías que llamamos «internas». Estas no se encuentran ligadas al espaciotiempo (como las traslaciones o las rotaciones), sino a los campos que usamos para describir las partículas elementales. En ellas reside gran parte de la importancia de los teoremas de Noether.

Simetrías ocultas

Las simetrías relacionadas con el espacio y el tiempo son fáciles de visualizar. Pero ¿en qué consisten las simetrías internas?

Consideremos una partícula de espín 1/2, como el electrón. Las ecuaciones fundamentales que la describen permanecerán invariantes si multiplicamos el campo asociado al electrón por un número complejo arbitrario de módulo uno. Como consecuencia, el primer teorema de Noether nos dice que también aquí deberá existir una cantidad conservada. Su interpretación se torna evidente si dejamos que los electrones interaccionen con un campo electromagnético: en tal caso, la cantidad conservada no es otra que la carga eléctrica.

En el modelo estándar existen muchas otras simetrías internas. Algunas son las llamadas simetrías gauge, en las que las transformaciones de los campos pueden depender del punto del espaciotiempo en el que nos encontremos. De estas últimas se ocupa el segundo teorema de Noether.

Simetrías cuánticas

Aunque los teoremas demostrados por Noether están formulados en un marco clásico, tienen también consecuencias cuando consideramos la versión cuántica de una teoría. En el átomo de hidrógeno, el campo eléctrico que «siente» el electrón presenta simetría esférica. Desde un punto de vista clásico, el primer teorema de Noether nos dice que el momento angular del electrón tiene que mantenerse constante en el tiempo.

En la teoría cuántica, sin embargo, esta ley de conservación implica que la energía del átomo no depende del número cuántico magnético (la proyección del momento angular del electrón a lo largo de una dirección dada). Existen diferentes estados, clasificados por los valores de dicho número cuántico, que, no obstante, tienen la misma energía.

De hecho, debido a la forma en que la fuerza electrostática disminuye con la distancia, el átomo de hidrógeno tiene una simetría aún mayor. Aplicando el teorema de Noether a esta simetría extendida, encontramos que, además del momento angular, hay otra cantidad conservada: el llamado vector de Laplace-Runge-Lenz. A nivel cuántico, esto implica que la energía tampoco depende del número cuántico que mide el momento angular del electrón.

Simetrías rotas

Los ejemplos anteriores nos muestran cómo las simetrías y las cargas conservadas pueden informarnos sobre los niveles de energía (el espectro) de un sistema cuántico. Hay sin embargo situaciones en las que los efectos cuánticos pueden destruir las leyes de conservación dictadas por los teoremas de Noether. Cuando eso ocurre, decimos que existe una «anomalía».

Algunas anomalías resultan inocuas e incluso sirven para explicar fenómenos físicos. Este es el caso de la simetría entre «izquierda» y «derecha» que exhiben las partículas clásicas sin masa de espín 1/2. El hecho de que esta simetría se rompa al considerar los efectos cuánticos explica, por ejemplo, por qué el pion neutro (una partícula compuesta por un quark y un antiquark) se desintegra en dos fotones.

El modelo estándar no respeta dicha simetría, ya que las partículas «diestras» y «zurdas» interaccionan de forma diferente con los bosones que transmiten la fuerza nuclear débil. Cuando eso ocurre, la conservación de la «carga gauge» (el equivalente a la carga eléctrica para otras interacciones) puede verse afectada por anomalías. En tal caso, sin embargo, la teoría pierde su coherencia matemática interna, lo que nos obliga a descartarla.

Este principio constituye una guía básica en la formulación de nuevas teorías. En el modelo estándar, estas anomalías letales se cancelan cuando tenemos en cuenta el efecto de todas las partículas. Sin embargo, no sucede lo mismo en otras teorías que aspiran a ampliar el modelo estándar. En otras palabras: preservar los teoremas de Noether a nivel cuántico impone serias limitaciones sobre el tipo de teorías que podemos considerar.

Un ejemplo nos lo proporciona el modelo supersimétrico mínimo, una propuesta muy estudiada para extender el modelo estándar de modo que incluya partículas supersimétricas. En este caso, la cancelación de anomalías implica que es necesario que exista un segundo bosón de Higgs, además del descubierto en 2012 en el CERN.

Así pues, los teoremas formulados por Emmy Noether en 1918 van mucho más allá de la conservación del momento o la energía. Abarcan cuestiones como la conservación de la carga eléctrica, nos informan sobre el espectro de un sistema cuántico, pueden usarse para predecir fenómenos físicos e imponen severas restricciones sobre cómo pueden ser nuestras teorías de partículas elementales. Pocos resultados obtenidos a lo largo del último siglo se han demostrado una guía tan fructífera en la exploración de las leyes fundamentales de la naturaleza.

Miguel Á. Vázquez-Mozo *es físico teórico en el Departamento de Física Fundamental de la Universidad de Salamanca.*

La meca de las matemáticas

A principios del siglo XX, el departamento de matemáticas de la Universidad de Gotinga se había convertido en un centro de excelencia mundial, algo que continuaría hasta 1933, año de la llegada de los nazis al poder. Fue en Gotinga donde se desarrolló el álgebra abstracta moderna, cuyos conceptos heredaron numerosos campos de la investigación matemática.

El crecimiento de la escuela de Gotinga se debió en gran parte al esfuerzo de dos brillantes e influyentes matemáticos: Felix Klein y David Hilbert. Klein, que se había unido a Gotinga en 1886, es más conocido por su «programa de Erlangen», el cual otorgó a la geometría una visión unificada basada en la noción de invariancia bajo grupos de transformaciones. Hilbert, más joven, llegó a Gotinga en 1895. Considerado uno de los matemáticos más grandes de su tiempo, en 1900 enunció una célebre lista de 23 problemas abiertos que inspiraron muchas de las investigaciones del siglo XX.



FELIX KLEIN (1849-1925)



DAVID HILBERT (1862-1943)

identidad: una especie de tautología matemática. Ese intercambio entre Klein y Hilbert, así como las notas tomadas por Rudolf Humm, estudiante suizo de Noether, muestran que los resultados de la matemática habían anticipado claramente los argumentos principales de Klein.

Pero Hilbert no solo estaba de acuerdo en líneas generales con el análisis de Klein sobre las leyes de conservación. Fue más allá y afirmó que la falta de una analogía entre la conservación de la energía clásica y su propia ecuación de la energía constituía una característica de la relatividad general. Incluso llegó a la hipótesis de que era posible demostrarlo como teorema. Klein respondió: «Me interesaría mucho ver la prueba matemática a la que se refiere en su respuesta». Para él, se trataba de explicar claramente qué significaba una ley de conservación con contenido físico real, en contraste con la expresión de una propiedad puramente formal. Ello se convertiría en el problema principal que abordó Noether a principios de 1918 en su trabajo sobre «problemas variacionales invariantes». Tras varios intercambios epistolares con Klein, Noether completó dicho trabajo y el 23 de julio presentó sus resultados ante la Sociedad Matemática de Gotinga.

En cuanto a las interpretaciones físicas, señaló que su primer teorema generalizaba el formalismo subyacente a los resultados habituales relacionados con las «integrales primeras» (las cantidades conservadas) en mecánica clásica. En lo referente al segundo teorema, Noether lo caracterizó como «la mayor generalización posible, en términos de teoría de grupos, de la "relatividad general"». Los resultados fundamentales que obtuvo no solo aclararon el significado de la ecuación de la energía de Hilbert, sino que también describieron las distintas formas en que pueden manifestarse las leyes de conservación, ya fuera en la mecánica clásica o en las teorías de campos. En cuanto a la hipótesis de Hilbert de que la ausencia de una verdadera ley de conservación de la energía constituía una característica de la relatividad general, Noether comentó en su artículo: «Para que esta afirmación sea literalmente válida, es necesario entender el término "relatividad general" en un sentido más amplio que el usual, y extenderlo a los grupos antes mencionados que dependen de funciones».

Con gran satisfacción, Klein presentó el artículo de Noether ante la Sociedad Científica de Gotinga el 26 de julio de 1918. De hecho, vio en los hallazgos de la matemática una justificación para su famoso «programa de Erlangen», escrito en 1872 y que proporcionaba una visión unificada de la geometría como el estudio de las propiedades que permanecen invariantes bajo grupos de transformaciones. Más tarde, Klein adaptó sus principios, basados en la teoría de grupos, con idea de convertirlos en una doctrina general para la nueva física. De acuerdo con el programa de Erlangen, la teoría de la relatividad debía entenderse en un sentido amplio como una teoría de invariantes relativa a un cierto grupo de transformaciones. Sin lugar a dudas, Noether consideró que su trabajo sobre leyes de conservación derivadas de principios variacionales se inscribía en este programa general.

PARA SABER MÁS

Invariante Variationsprobleme. Emmy Noether en *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, curso de matemáticas y física de 1918, págs. 235-257, 1918. Una traducción al inglés se encuentra disponible en **arxiv.org/abs/physics/0503066**

The Göttingen response to general relativity and Emmy Noether's theorems. David Rowe en *The symbolic universe: Geometry and physics 1890-1930*, dirigido por Jeremy J. Gray, Oxford University Press, 2011.

The Noether theorems: Invariance and conservation laws in the twentieth century. Yvette Kosmann-Schwartzbach. Springer, 2011.

A richer picture of mathematics: The Göttingen tradition and beyond. David Rowe. Springer, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad. Leo Corry en *IyC*, noviembre de 1998.

Emmy Noether. Renata Tobies en *IyC*, diciembre de 2004.

ECOLOGÍA

Extinciones causadas por la pesca



Repoblar ríos y lagos con peces para la pesca deportiva favorece a los pescadores, pero provoca una catástrofe ecológica

Richard Conniff



Richard Conniff es un premiado escritor y columnista del *New York Times*. Entre sus libros se encuentran *House of the lost words* (Yale University Press, 2016) y *The species seekers* (W. W. Norton, 2010).



Repoblar las aguas continentales de los Estados Unidos con peces destinados a la pesca recreativa es uno de los escasos programas federales ampliamente apoyado por los contribuyentes. Conserva el atractivo imperecedero de los dibujos de Norman Rockwell, basado en la idea de que, con algo de ayuda, cualquier lago o arroyo puede ser el lugar donde uno puede tentar a la suerte y, quizá, capturar algo para la cena.

La repoblación constituye la base de la industria de la pesca recreativa, valorada en 25.700 millones de dólares según las estimaciones realizadas por diversas agencias federales en 2011. Es más, liberar en ríos y lagos alevines nacidos en cautividad ha formado parte de la política gubernamental desde finales del siglo xix, llegándose a utilizar aviones en los años cincuenta para soltar millares de alevines en lagos remotos.

Pero, con el tiempo, la repoblación indiscriminada se ve cada vez más como una de las peores acciones que se han hecho contra el ambiente, porque los peces introducidos tienden a desplazar a las especies autóctonas. «Pensémoslo por un momento», reclama Julian D. Olden, ecólogo de la Universidad de Washington cuya investigación se centra en los peces introducidos. «Los peces empleados en repoblación son los de crecimiento más rápido, los más fecundos y los más grandes que muerden el anzuelo», dice en referencia a la trucha, la perca americana, el lucio y otras especies ampliamente introducidas en los ríos y lagos de los Estados Unidos para favorecer la pesca recreativa. En resumen, seleccionamos a los depredadores más agresivos. «No debería sorprendernos que las mismas características que apreciamos como pescadores sean a su vez las responsables del enorme impacto que causan en las especies autóctonas y los ecosistemas», afirma Olden.

Resulta innegable el papel que la repoblación ha desempeñado en la recuperación de especies antaño amenazadas, como la trucha de lago en los Grandes Lagos o el salvelino del Parque Nacional de las Grandes Montañas Humeantes. Pero, a su vez, las piscifactorías y las repoblaciones han llevado al sacrificio de ríos y lagos en nombre del progreso, subraya Rick Williams, biólogo pesquero que trabaja para Fly Fishers International. Según él, quienes proponían la creación de infraestructuras decían: «Vamos a construir una presa en esta cuenca y gracias a ella obtendremos todos estos beneficios». Los promotores admitían que quizá se produjeran algunos impactos negativos sobre las poblaciones locales de salmón o de trucha arcoíris migratoria, por ejemplo, pero minimizaban las consecuencias y declaraban: «No hay problema; construiremos una piscifactoría». Con el tiempo, una vez el hábitat ya había sido dañado de forma irremediable, la gente se daba cuenta de que «un pez de granja no era igual que un pez silvestre». Las adaptaciones necesarias para sobrevivir en una piscifactoría abarrotada no necesariamente generan una elevada supervivencia en la naturaleza ni garantizan el éxito reproductivo. De acuerdo con un estudio publicado en 2016, basta una generación en cautividad para alterar la expresión de un centenar de genes en la forma migratoria de la trucha arcoíris, en comparación con la expresión de esos mismos genes en la población silvestre.

Como consecuencia, ciertos funcionarios estatales y federales, así como algunos pescadores recreativos, han empezado a replantearse nuestra fe ciega en la repoblación y, en algunos casos, a trabajar para revertir sus efectos destructivos. En agosto de 2016, el Servicio Nacional de Parques aprobó un plan para eliminar los peces introducidos en 85 lagos de montaña de los parques

PÁGINAS ANTERIORES: MIKE POWELL, GETTY IMAGES

EN SÍNTESIS

Repoblar las aguas interiores con truchas, lucios, percas y otras especies destinadas a la pesca recreativa es una tradición popular y bien vista desde antiguo.

Sin embargo, introducir estos peces allí donde no existen de forma natural puede tener efectos devastadores sobre las especies autóctonas y el ecosistema.

En EE.UU. la administración y algunos pescadores preocupados por el ambiente trabajan desde hace poco para reducir este impacto, aunque no todo el mundo apoye sus esfuerzos.









LAS ESPECIES ampliamente utilizadas para repoblación, como el salvelino (*1*), la trucha de lago (*2*) y el lucio son depredadores agresivos. Estos peces se crían en piscifactorías y se liberan en ríos y lagos (*4*), donde pueden erradicar a las especies autóctonas.

JOHN KUCZALA, GETTY IMAGES (1); GETTY IMAGES (2 Y 3); STEPHEN OSMAN, GETTY IMAGES (4)

nacionales de las Secuoyas y Cañón de los Reyes, en California. Un año más tarde, Oregón permitió la pesca ilimitada de la perca americana, la lucioperca americana y otras especies introducidas en tres ríos donde interferían con las especies autóctonas. Además, la creación de una red nacional de refugios de pesca empezó a tomar cuerpo en 2015, cuando Carolina del Norte, Georgia y Tennessee designaron la cuenca del Pequeño Río Tennessee como Área de Conservación de Peces Autóctonos.

AGUAS TURBULENTAS

La preocupación por los impactos ocultos de la repoblación surgió desde un primer momento. En Europa, los primeros experimentos de cría en cautividad y repoblación datan del siglo XVIII y la práctica se extendió a los Estados Unidos un siglo después, a medida que las aguas continentales sufrían los efectos de la sobrepesca. A Olden le gusta mostrar a sus estudiantes un artículo publicado en 1893 en un periódico de Oregón, en el cual se debatía si la introducción de la perca americana en la cuenca del río Columbia sería una bendición («el mejor amigo no solo de nuestros salmones y truchas, sino también de nuestras aves acuáticas») o una maldición («el enemigo natural de todos los alevines»).

Pero incluso quienes mejor deberían haberlo sabido infravaloraron los riesgos potenciales de la introducción. Hace más de un siglo, Robert Roosevelt, congresista del estado de Nueva York y uno de los primeros conservacionistas, además de tío del futuro presidente, fue uno de los principales responsables del inicio del programa gubernamental de repoblación en el país. En 1871, impulsó en el Congreso la creación de la Comisión de Pesca de los Estados Unidos con el objetivo de investigar el declive de las pesquerías y el potencial de la acuicultura para repoblar las aguas continentales. En pocos años, la recién finalizada red de ferrocarril transcontinental transportaba salvelinos del este hacia el oeste y truchas arcoíris en sentido contrario, con frecuentes paradas durante el trayecto para repoblar las masas de agua locales.

Como resultado, el entusiasmo por las repoblaciones se disparó, aunque a menudo con consecuencias devastadoras. Ya en 1910, *Oncorhynchus clarkii macdonaldi*, una subespecie de trucha muy popular entre los pescadores locales que podía superar los cinco kilogramos de peso, había desaparecido de los Lagos Gemelos de Colorado debido a la hibridación con la trucha arcoíris y la competencia con otras especies introducidas. Estos mismos factores, junto con la sobrepesca, acabaron con *Salvelinus agassizi*, un salmónido endémico de Nuevo Hampshire, descrito por primera vez en 1885 y declarado extinto en 1939. En una de las acciones de «mejora» más chocantes jamás emprendidas, el estado de Oregón envenenó a las lampreas del lago Miller porque depredaban a las truchas allí introducidas. En 1989, un estudio señaló la introducción de especies exóticas como una causa de la extinción de más de una

Peces invasores de las aguas continentales españolas

Además de desplazar a algunas especies nativas, los peces introducidos para la pesca pueden alterar el hábitat y la calidad de las aguas

ALBERTO MACEDA VEIGA

Una de las consecuencias más visibles de la globalización es la introducción de especies exóticas, organismos transportados voluntaria o involuntariamente por los humanos desde su hábitat de origen hasta zonas geográficas donde históricamente nunca estuvieron presentes. Este movimiento de especies puede no causar problema alguno en los ecosistemas de acogida, pero a menudo tiene efectos catastróficos. Las nuevas especies pueden provocar daños en la biodiversidad nativa (como los producidos por la introducción de conejos en Australia), la economía de un país (como los provocados por el mejillón cebra) o el propio bienestar humano (como los causados por el mosquito tigre). En tales situaciones se denomina invasoras a las especies exóticas.

Entre los grupos faunísticos más afectados por el fenómeno de las invasiones biológicas figuran los peces de río y, en concreto, las comunidades de peces de los ríos españoles que, como las de otras regiones de clima mediterráneo, ostentan el récord de hallarse entre las más invadidas a escala mundial. Por este motivo resultan esenciales las medidas legislativas que regulen la entrada de especies exóticas en un país y se necesitan estrategias de gestión diferentes para ellas y para las especies autóctonas de nuestros ecosistemas.

La percepción del problema de la invasión de peces exóticos varía entre colectivos y, como en todo conflicto socioecológico, la dimensión humana no debe obviarse en su gestión. A fin de cuentas, es la sociedad, de la mano de los políticos, la que decide qué especies quiere proteger haciendo uso de la legislación. Pero, además, estas decisiones nunca deberían fraguarse a espaldas del conocimiento científico, más si consideramos que la conservación de la biodiversidad nativa tiene un valor patrimonial *per se*, además de mostrar múltiples beneficios que repercuten de manera directa e indirecta en el propio bienestar de la sociedad.

Tenemos la suerte de que el conocimiento científico es extenso en el campo de las invasiones por peces exóticos, especialmente cuando las especies invasoras afectan a numerosos países. Algunas de ellas son apreciadas en la pesca recreativa, como la perca americana (*Micropterus salmoides*), el siluro (*Silurus glanis*), la lucioperca (*Sander lucioperca*) o la carpa (*Cyprinus carpio*), entre otras, habiendo invadido esta última más de 50 países, incluida España. También son apreciados el alburno (*Alburnus alburnus*) o el escardinio (*Scardinius erythrophthalmus*), ambos introducidos como forrajeo para los peces exóticos depredadores que se pescan (todos los mencionados arriba, excepto la carpa).

1



La invasión de la misma especie en múltiples países de áreas distantes denota el interés que despierta la especie en algún colectivo (sobre todo los pescadores) de todos ellos. Así, los efectos observados en una región no tardan en aparecer en otras, y es precisamente a partir del estudio de estos patrones, de las vías de introducción de las especies y de sus impactos conocidos de cualquier índole que pueden establecerse las medidas legislativas. Teniendo en cuenta los análisis realizados hasta la fecha en España y otras regiones mediterráneas, no hay duda de que la mayoría de los peces exóticos invasores de nuestros ríos son especies que han proliferado debido al atractivo que suponen para la pesca recreativa, aunque la introducción de algunas de ellas tuvo en el pasado el beneplácito de la Administración.

El impacto de la carpa

Por mucho tiempo que lleve una especie exótica en una región, nunca se convertirá en nativa. La carpa, por ejemplo, que suele con-

docena de especies norteamericanas durante el siglo anterior; y la tasa de extinción parece haber aumentado un 25 por ciento desde entonces.

«No solo sucede aquí, sino en todo el mundo», afirma Vance T. Vredenburg, herpetólogo de la Universidad Estatal de San Francisco dedicado a estudiar el impacto de las introducciones de peces sobre la fauna autóctona. «La trucha arcoíris dorada es un pez bonito, lo que motivó su introducción en México y los Andes, así como en Nueva Zelanda y el Kilimanjaro», sin ninguna preocupación por el impacto que pudiera tener sobre las especies nativas. Y ello a pesar de que, en su informe de 2016, el Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF) señalara a la introducción de especies y las enfermedades como dos de las tres principales causas de extinción de peces y anfibios, cuyas poblaciones han declinado un 81 por ciento desde 1970.

En 2004, Vredenburg demostró experimentalmente el impacto de la introducción de peces sobre la rana montana patiamarilla, una especie autóctona de Sierra Nevada, en California. Su trabajo en el Parque Nacional Cañón de los Reyes le había llevado a sospechar que el salvelino y la trucha arcoíris, in-





En la laguna de Zóñar (*1*), en Córdoba, la proliferación de la carpa (*2*) altera las poblaciones de algunas especies de ánades mundialmente amenazadas, entre ellas la malvasía cabeciblanca (*3*). La carpa destruye las plantas acuáticas y los insectos asociados a ellas, de los que se alimenta esta ave.

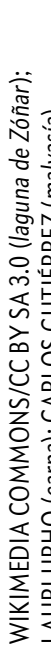
siderarse nativa de nuestras aguas, es originaria de Asia y corresponde a una de las introducciones de peces más antiguas documentada en España, del tiempo de la civilización romana. La especie causa graves impactos en nuestros ecosistemas, como lo confirman numerosas investigaciones.

En 2017, nuestro grupo publicó un estudio en la revista *Biological Conservation* en el que describíamos cómo dos ciclos de invasión por carpa en dos lagunas del sur de España habían reducido la superficie ocupada por las plantas acuáticas y habían afectado a algunas aves, entre ellas dos ánades mundialmente amenazadas, la malvasía cabeciblanca (*Oxyura leucocephala*) y el porrón europeo (*Aythya ferina*). Al resuspender el sedimento del fondo de la laguna, la carpa enturbia el agua y arranca las plantas acuáticas. Estas mueren como consecuencia del arranque o debido a que el agua turbia las asfixia e impide la entrada de luz que necesitan para hacer la fotosíntesis. Al desaparecer las plantas también lo hacen todos los invertebrados que viven asociados a ellas. Como consecuencia, disminuye drásticamente la abundancia de los patos herbívoros y de los que se alimentan de insectos, como las ánades mencionadas.

Además de la biodiversidad de las especies nativas, también se ve alterado el hábitat que estas ocupan. Este último efecto reviste importancia porque puede perjudicar y, por tanto, encarecer el proceso de potabilización de agua para consumo humano. Ello se debe a que algunos ciprínidos invasores en España, como el alburno, se alimentan de cladóceros y otros organismos que desempeñan una importante función de reciclaje de nutrientes y depuración del agua en embalses y lagos.

En resumen, la denominación de «especie exótica invasora» debe aplicarse sin excepción a todo organismo que causa impactos negativos documentados sobre la biodiversidad nativa. A fin de promover el control de estas especies, deben aplicarse medidas que tengan en cuenta el papel ecológico que ejercen ahora las introducciones antiguas, cuán factible es su erradicación y, en caso de realizarse esta, debe considerarse la legislación vigente en bienestar animal y gestión de residuos biológicos. Bajo ningún concepto debe promoverse su expansión ni contribuir a la viabilidad de sus poblaciones con refuerzos poblacionales o pescas en la modalidad de captura y suelta.

Alberto Maceda Veiga *es profesor e investigador del Departamento de Biología Evolutiva, Ecología y Ciencias Medioambientales, del Instituto de Investigación de la Biodiversidad de la Universidad de Barcelona.*



troducidos en lagos de alta montaña donde antes no existían peces, devoraban los renacuajos antes de que estos pudieran convertirse en ranitas. Para evaluar su hipótesis, Vredenburg eliminó los peces de cinco lagos del parque. Durante los seis años siguientes, observó cómo la población de ranas se recuperaba rápidamente en dichos lagos, mientras los renacuajos seguían desapareciendo de ocho lagos próximos donde aún medraban las truchas alóctonas.

Otros estudios sugieren que los peces introducidos han alterado ecosistemas enteros en el mismo parque. Las especies están conectadas por vínculos insospechados y «con los peces exóticos, esas conexiones se rompen», explica Danny Boiano, el ecólogo acuático del parque. Las ranas eran la principal presa para las serpientes de jarretera montanas del parque. Al reducirse la abundancia de ranas debido a la introducción de peces, las serpientes de jarretera empezaron a escasear. El pinzón montano nuquigrís, un ave muy ligada a los hábitats alpinos rocosos, realiza incursiones en los lagos de alta montaña para alimentarse de efémeras. Cuando los peces introducidos redujeron la abundancia de estas últimas, los pinzones disminuyeron tam-

bién su presencia. Además, los peces alteraron drásticamente las poblaciones de *Daphnia* y otras formas de zooplancton situadas en la base de la red trófica.

Vredenburg recuerda que su primer estudio sobre las ranas no atrajo el interés de los gestores, quizás en parte debido a la creencia ciega en las bondades de la repoblación. El Servicio Forestal de los Estados Unidos reconoció que el investigador había identificado un problema en el parque, pero también apuntó que otros ecosistemas habían respondido de otro modo: «Conocemos lugares donde las ranas y los peces coexisten». Según los gestores, el experimento debía repetirse para demostrar que no se trataba solo de un problema local o de los datos de una única persona, afirma Vredenburg.

El Departamento de Pesca y Vida Silvestre de California (llamado entonces Departamento de Caza y Pesca), también se resistió a modificar su programa de repoblación. No se trataba tanto de una cuestión económica, sino de «poder, autoridad y objetivos estratégicos», explica Kierán Suckling, director ejecutivo del Centro para la Diversidad Biológica de Tucson, Arizona. Soltar peces era simplemente lo que los departamentos de caza y pesca, financiados en gran medida gracias a las licencias de caza y pesca, habían hecho desde sus orígenes. Suckling remarca la contradicción: con una mano, el departamento gastaba dinero en la protección de raras especies nativas de anfibios y peces, mientras con la otra gastaba aún más dinero en introducir truchas exóticas en aguas donde esta práctica amenazaba al menos a 39 especies autóctonas. Fue necesario que los ecologistas emprendieran acciones legales, y que primero el estado, en 2012, y luego el Gobierno federal, en 2014, declarasen especie amenazada a la rana montana patiamarilla, para producir una variación de rumbo.



LAS ESPECIES AUTÓCTONAS desplazadas por los peces introducidos no pueden recuperar sus hábitats si no cesan las repoblaciones. Estos esfuerzos de remediación podrían explicar la reciente recuperación de la rana montana patiamarilla en el Parque Nacional de Yosemite, en California.

JOEL SARTORE *GETTY IMAGES*

EN EL ANZUELO

Desde entonces, California ha experimentado grandes cambios en su política de repoblación de peces, según Roger Bloom, responsable de la gestión de las pesquerías continentales en el Departamento de Pesca y Vida Silvestre de California. Para empezar, ha cesado la repoblación de centenares de lagos. Y allí donde se continúan liberando peces, el énfasis se pone ahora en las especies autóctonas, ya que como mínimo el 25 por ciento de los ejemplares liberados deben pertenecer a esa categoría. En unas pocas localidades, el estado libera únicamente especies autóctonas, como en el caso de *Oncorhynchus clarki henshawi* en los ríos Truckee y Carson, de donde es endémica.

«Nuestro mantra», afirma Bloom, «es emplear el pez adecuado en el lugar, el momento y la cantidad adecuados y estar seguros de los beneficios y los impactos sobre el ecosistema». El estado realiza una evaluación ambiental de toda nueva área propuesta para repoblación, así como estudios de impacto ambiental periódicos en todas las aguas ya repobladas. Bloom bromea sobre las caras de sorpresa de los funcionarios de pesca de otros estados al oír semejante programa. «Creo que estamos muy por delante del resto debido a la gran cantidad de especies amenazadas que tenemos y a la complejidad de su conservación», afirma.

Otros estados podrían estar captando el mensaje. «Teóricamente, todos ellos se preocupan por las especies vulnerables» antes de realizar una repoblación, remarca Suckling. «Pero no siempre lo hacen, a menos que se les demande por ello.» Una combinación de normas federales y estatales «débiles y excesivamente complejas», en palabras de Suckling, complican aún más el proceso. Pero en California «la Ley de Especies Amenazadas está en vigor y eso lo cambia todo», explica. «Es clara, fuerte y se puede aplicar, y por eso las cosas están cambiando con más rapidez.»

Pero para algunos pescadores resulta un agravio. Cuando California anunció el cese de la repoblación en 175 lagos y arroyos, con el fin de proteger a las especies autóctonas, el titular de la columna del *San Franscisco Chronicle* dedicada a las actividades al aire libre sentenciaba: «¡Un cargamento de ranas!». «Todo lago es el lugar favorito de alguien, así que no importa qué lagos dejemos de repoblar; siempre habrá alguien enfadado», subraya Jessica Strickland, bióloga pesquera de Trout Unlimited, una organización de pescadores interesados en la conservación, con base en Arlington, Virginia. «El pescador local quiere seguir pescando allí donde lo venía haciendo. Pero el que está preocupado por el ambiente piensa: “Bueno, basta con ir a pescar a uno de los 9000 lagos restantes”» que se siguen repoblando. Y añade que, para Trout Unlimited, lo importante es que las agencias gubernamentales operen de forma transparente, permitiendo a los pescadores dar su opinión y dándoles tiempo para entender los cambios en la política de repoblación.

«Como mucho, hemos tenido problemas con las especies amenazadas en el 2 o 5 por ciento de las zonas repobladas», asegura Suckling en relación con los cursos fluviales de California. «Esto se debe a que tales especies han retrocedido hasta quedar acantonadas en pequeñas áreas inalteradas. Existen muy

pocas posibilidades de devolverlas a los ríos principales. Están contaminados y repletos de especies exóticas.»

En otras partes, el abandono de las políticas tradicionales de repoblación progresa lentamente. El Área de Conservación de Peces Autóctonos del Pequeño Río Tennessee se sigue repoblando con especies exóticas, según Fred Harris, pescador, biólogo pesquero jubilado e implicado en el proyecto. «La trucha arcoíris y la común son muy populares», comenta, «y la última cosa que uno quiere antes de empezar un proyecto de conservación es tocar las narices a un montón de pescadores».

En cambio, afirma, el proyecto quiere continuar trabajando en torno a las repoblaciones. Eliminar obstáculos para permitir la migración aguas arriba del salvelino y de otras especies autóctonas, así como recuperar el hábitat, constituyen dos de las prioridades. Pero al mismo tiempo, el proyecto mantiene intactas ciertas barreras para contener aguas abajo a las truchas comunes y arcoíris introducidas.

En algunas zonas donde han cesado las repoblaciones y se han eliminado las especies exóticas, los hábitats se están recuperando

Esta estrategia de avanzar lentamente puede satisfacer a los pescadores, pero entraña sus riesgos. La cuenca del Pequeño Río Tennessee es un elemento clave para la conservación de uno de los mayores tesoros de la biodiversidad de los Estados Unidos, aunque poco conocido; más de la tercera parte de las 840 especies de bivalvos de agua dulce del mundo viven en Norteamérica, la mayoría en el sudeste. Han coevolucionado con los peces autóctonos, desarrollando ingeniosos mecanismos para atraerlos hacia ellos lo suficiente como para que sus larvas alcancen las branquias de los peces. Estos pasan a convertirse en criaderos flotantes de larvas de mejillón y almeja, que son diseminadas por doquier. Este mecanismo maximiza la dispersión de animales cuya vida transcurre enterrada en el fango. También beneficia al hábitat, porque los bivalvos filtran las bacterias y las algas del agua.

Sin embargo, Suckling, cuyo Centro para la Diversidad Biológica acaba de abrir una oficina en el sudeste, cree que la repoblación continuada con especies exóticas destinadas a la pesca recreativa puede acabar desplazando a las especies autóctonas y tirando a la basura las estrategias coevolutivas de los bivalvos. Combinada con la contaminación del agua, las presas, la desecación de humedales y otras modificaciones del hábitat, dicha sustitución de especies podría empujar hacia la extinción a los bivalvos de agua dulce autóctonos, uno de los grupos más amenazados en los Estados Unidos.

RECUPERACIÓN POSIBLE

En este contexto, la lucha contra las repoblaciones parece destinada a extenderse y a subir de tono. Pero también existen noticias alentadoras: en algunas de las zonas donde han cesado las repoblaciones y se han eliminado las especies exóticas antes de que haya sido demasiado tarde, los hábitats originales se están recuperando. La recuperación ha sido «rápida, muy rápida» en los lagos del Parque Nacional del Gran Paraíso, en los Alpes italianos, una vez los investigadores eliminaron las truchas comunes introducidas, explica Rocco Tiberti, de la Universidad de Pavía. *Daphnia* y otros invertebrados que habían resultado diezmados proliferaron repentinamente. Los «quistes de resistencia» producidos durante períodos de estrés vividos hacía años, o incluso décadas, se despojaron de sus cubiertas resistentes tras un período de latencia y repoblaron el lago. «Muchas poblaciones pueden recuperarse incluso tras una extinción local», opina Tiberti.

De modo similar, un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en octubre de 2016 daba cuenta de la espectacular recuperación de la rana montana patiamarilla en el Parque Nacional de Yosemite, en California. Muchos de los informes sobre dicha recuperación barajaban la posibilidad de que, tras años de exposición al hongo responsable de la quitridiomicosis, causante de más de 100 extinciones de anfibios desde los años setenta, las ranas hubieran desarrollado algún tipo de resistencia. Pero existía un inconveniente: la recuperación se producía únicamente en Yosemite. Los autores del artículo antes citado proponían una explicación mucho más sencilla. En 1991, el Servicio de Parques Nacionales cesó la repoblación de lagos de alta montaña con peces exóticos. Aunque dichos lagos aún están habitados por peces introducidos en actuaciones anteriores, el cese de las repoblaciones ha dado un respiro a las ranas, incluso aunque no se hayan eliminado completamente los peces.

De vuelta a Sierra Nevada, Vredenburg, uno de los autores del artículo de *PNAS*, ve alejarse el riesgo de extinción de sus ranas y remarca el daño que los humanos hemos causado a las especies de agua dulce, sea por el uso de plaguicidas o el cambio climático. «Es una muerte lenta», resalta. «Pero los anfibios han estado aquí durante 360 millones de años. Son supervivientes. Bastaría eliminar algunos de los obstáculos, como los peces introducidos, para que tuvieran una oportunidad de seguir adelante.» IyC

PARA SABER MÁS

Nonnative trout impact an alpine-nesting bird by altering aquatic-insect subsidies. Peter N. Epanchin et al. en *Ecology*, vol. 91, n.º 8, págs. 2406-2415, agosto de 2010.

Large-scale recovery of an endangered amphibian despite ongoing exposure to multiple stressors. Roland A. Knapp et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 113, n.º 42, págs. 11.889-11.894, 18 de octubre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Especies invasoras. Robert Barbault y Anne Teyssèdre en «Conservación de la biodiversidad», colección *Temas* de *IyC* n.º 61, 2010.

La invasión de las planarias. Ronald Sluys en *IyC*, mayo de 2017.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.



Senderos de luz en el agua

Los reflejos sobre un lago o un río producen en ocasiones extrañas franjas claras y oscuras, un fenómeno que puede ser más complejo de lo que aparenta

La superficie del agua nunca parece uniforme, ya que el movimiento del líquido modifica los colores y las formas que vemos en él. Sin embargo, si examinamos este efecto más a fondo, pronto descubriremos algunos fenómenos que, a primera vista, resultan desconcertantes.

Con independencia de su aspecto, la imagen reflejada siempre guarda alguna relación con el cielo y con los alrededores, de eso no cabe duda. Por lo general, ese vínculo puede encontrarse sin dificultades sin más ayuda que la ley de la reflexión. No obstante, si el viento produce olas que, además, se dirigen hacia el observador, a menudo cuesta entender las estructuras resultantes. Así puede ocurrir, por ejemplo, en la superficie de un río o un lago agitado.

Observe con detenimiento la primera imagen que reproducimos aquí. En ella podemos distinguir las «olas» (pequeñas ondulaciones, en realidad), puesto que sus flancos reflejan el gris del cielo, al tiempo que el área de las crestas hace lo propio con la tenue luz de los árboles cercanos a la orilla (*véase la gráfica adjunta*).

Las franjas verticales claras que van desde el borde superior de la imagen hacia el observador pueden atribuirse sin dificultad a los espacios que hay entre los árboles. Sin embargo, lo que no resulta evidente es hasta dónde se extenderán dichas franjas en el agua. Además, si el observador se mueve a lo largo de la orilla, las rayas parecerán desplazarse con él y continuarán apuntando en su dirección.

Espadas de sol

Esto nos trae a la cabeza otro fenómeno que tiene lugar en el agua y que podríamos



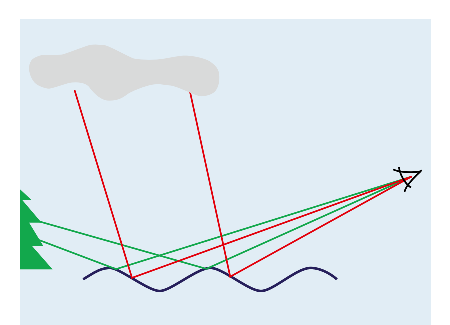
ESPADAS DE LUZ: En esta imagen, los huecos existentes entre los árboles dejan pasar luz que se refleja en la superficie del agua, donde aparecerán franjas brillantes en aquellos planos de la superficie que exhiban la orientación adecuada. En la parte inferior de la foto, tales reflejos ya no llegan al observador y solo se ve el gris del cielo. El tono ligeramente más oscuro del flanco de las olas podría deberse al hecho de que estos reflejan menos luz, ya que esta incide más inclinada con respecto a la superficie y, en consecuencia, se absorbe más.

denominar «espada de sol» (en honor a un capítulo de una de las obras de Italo Calvino), consistente en el reflejo alargado que deja el sol naciente o poniente sobre el líquido. Este conjunto de reflejos luminosos aparecerá en todos los lugares que presenten la orientación adecuada para enviar los rayos del sol (siempre que este se encuentre cerca del horizonte) hasta los ojos del observador. Sobre una superficie agitada y reflectante, existen incontables planos con esa propiedad. En nuestra primera fotografía, las zonas claras que hay entre los árboles oscuros adoptan el papel del sol. En consecuencia, no hay una sola «espada de luz», sino muchas de ellas.

Darse cuenta de todo esto resulta más difícil si, como ocurre en nuestro ejemplo, hay una franja de agua con un tono claro paralela a la orilla. En este caso, una corriente ha «rizado» la superficie del líquido y el movimiento caótico de las olas mezcla la luz reflejada, dando lugar a un color gris uniforme. En otras ocasiones, es el viento el que altera la imagen de manera similar.

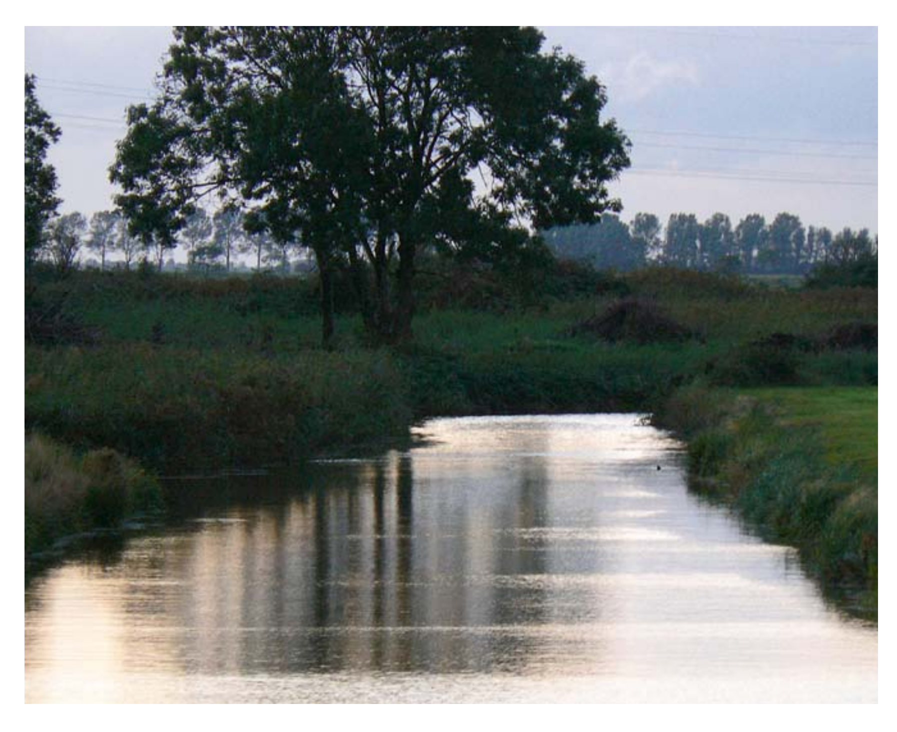
Tales perturbaciones locales en la superficie del agua debidas a ráfagas aisladas de viento pueden dejar varias franjas brillantes que discurrirán en dirección perpendicular a la de las «espadas de luz». Así ocurre en la segunda fotografía que reproducimos aquí. Como resultado, acabamos viendo un patrón casi cuadriculado.

En nuestra segunda imagen también hay árboles, que en este caso crecen en el



REFLEJOS Y ONDULACIONES: Los numerosos reflejos que podemos observar sobre la superficie del agua agitada se deben a que en ella coexisten planos con múltiples orientaciones. En este ejemplo, los flancos de las «olas» orientados hacia el observador envían hacia este la luz proveniente del cielo. La región de las crestas, en cambio, refleja la luz que procede de cerca del horizonte.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN H. JOACHIM SCHLICHTING *(gráfico)*



RACHAS DE VIENTO: Las ráfagas aisladas de viento pueden perturbar el patrón de las ondulaciones sobre el agua y, con ello, el de los reflejos que esta genera. Aquí, varias rachas de viento lateral interrumpen la secuencia vertical de franjas generada desde el fondo de la imagen.



SOMBRAS ALARGADAS: Esta fotografía del río Arno, en Florencia, puede interpretarse como una enorme franja luminosa interrumpida solo en aquellos lugares donde el puente y los viandantes generan sombras. Sin embargo, las producidas por estos últimos son proporcionalmente mucho más alargadas que las creadas por el puente. Dicho efecto surge porque, debido a las ondulaciones del agua, llega luz proveniente de múltiples puntos que habrían permanecido a oscuras en una superficie reflectante plana.

lado izquierdo del canal. Podemos deducir que el viento debe de haber pasado a través de los huecos que hay entre ellos, lo que habría perturbado la evolución normal de las ondulaciones sobre el agua.

A diferencia de lo que ocurría en la primera fotografía, los senderos de luz de este segundo ejemplo no proceden de los espacios entre los árboles, sino que se deben a los haces de luz que pasan a través de las oquedades de una copa frondosa. El agua ondulada los extiende, a la manera de una «espada de sol», formando brillantes sendas de luz que se complementan con las rayas oscuras generadas por el follaje.

Así pues, los huecos en el contorno próximo al horizonte dan lugar a fenómenos muy similares a los que observamos para fuentes de luz independientes. Sin embargo, también puede apreciarse el efecto inverso cuando las sombras de objetos individuales interrumpen la uniformidad de un entorno brillante.

Senderos de sombra

Cuando un sendero de luz es tan ancho que cubre casi la totalidad del agua, dejamos de percibirlo como tal. Pero podemos detectarlo indirectamente si un objeto bloquea la luz y forma, de manera complementaria, lo que podríamos llamar un «sendero de sombra».

Este fenómeno me causó verdaderos quebraderos de cabeza en cierta ocasión en que me encontraba en Florencia. Como puede observarse en la tercera fotografía, el agua del río Arno reflejaba el cielo rojizo del atardecer sobre una superficie extensa. Sin embargo, en el borde del área ensombrecida por los arcos del puente podían identificarse unas misteriosas puntas oscuras.

Aquellas puntas se desplazaban, por lo que deduje que probablemente fuesen producidas por los viandantes que paseaban en una y otra dirección. En el crepúsculo, las personas apenas podían distinguirse de los árboles lejanos y oscuros que aparecían al fondo. Sin embargo, sus alargadas y puntiagudas sombras sobre el agua ondulada revestían un tamaño considerable.

Pero entonces, ¿no debería ser también mucho más alargado el reflejo del puente? Normalmente lo sería. Pero, en este caso, el sendero de luz que aparece tras los arcos «se colaba», por así decirlo, por debajo. Y, debido a las ondulaciones del agua, podía verse la luz proveniente de puntos que habrían permanecido oscuros en una superficie reflectante plana. Como consecuencia, la sombra horizontal de la enorme estructura se reducía.

Como revelan estos ejemplos, algunos fenómenos físicos sencillos, como la «espada de sol», pueden llegar a manifestarse de una forma mucho más compleja y sutil en un contexto tan solo ligeramente distinto. IyC

PARA SABER MÁS

Das Schwert der Sonne: Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 1: Überblick und Phänomene. H. J. Schlichting en *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, vol. 51, n.º 7, págs. 387-397, 1998.

Das Schwert der Sonne: Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 2: Mathematische Modellierung und Simulation. H. J. Schlichting en *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, vol. 52, n.º 6, págs. 330-336, 1999.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los reflejos del agua y sus curiosas propiedades. Jearl Walker en *IyC*, marzo de 1987.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



Manipulación y persuasión numérica

La manera en que nuestro cerebro procesa los números ha dado pie a todo tipo de trucos cognitivos para que consumamos más

Ha llegado la Navidad y Madrid, como muchas ciudades del mundo, parece haberse convertido en un gigantesco zoco. ¿Se siente el lector abrumado por la multitud de luces que adornan su ciudad? ¿Experimenta una mezcla de excitación y ansiedad? ¿Se desorienta con tanto gentío y algarabía?

Esa inquietud anímica es resultado de sutiles manipulaciones. Estas consiguen que usted, que busca un producto concreto, experimente el impulso incontrolado de consumir. Está sufriendo los efectos de la «transferencia de Gruen», así llamada en honor al arquitecto austríaco Victor Gruen, quien diseñó el primer centro comercial en 1956. Hasta finales del siglo XIX, los comerciantes no usaban el entorno de venta como acicate para el consumo. Como mucho, un vendedor que competía por una buena posición en el mercado apilaba sus productos de manera atractiva. La ambientación coercitiva cambió totalmente este panorama: los científicos habían descubierto que nuestro inconsciente generaba respuestas irracionales pero mecánicas frente a determinados estímulos.

A partir de numerosos experimentos, inicialmente de corte conductista, en áreas como la mercadotecnia, la publicidad o la organización del trabajo, así como de los avances en psicología y neurología de la conducta, han surgido nuevas áreas como el neuromárketing o la economía conductual. La economía clásica supone que las personas toman decisiones racionales y, si se equivocan, esos errores se corrigen con rapidez. Sin embargo, décadas de investigaciones han demostrado que, frente a determinados estímulos, nuestro comportamiento se torna indefectiblemente irracional.

En principio eso sería una mala noticia para economistas y publicistas, ya que ¿cómo prever el comportamiento de las personas si estas son erráticas e insensatas? Sin embargo, la buena noticia para ellos, y mala para nosotros, es que somos previsiblemente irracionales. Nuestro comportamiento irracional es sistemático y muestra patrones repetitivos. Debido al funcionamiento de nuestro cerebro, todos cometemos los mismos errores frente a ciertos condicionamientos. Para ilustrar cómo se usan estos conocimientos, y ya que esta es una columna de matemáticas, a continuación nos centraremos en su uso con los números.

Llléveselo a casa por 19,99

Comencemos con un ejemplo conocido desde los años treinta del siglo XX: los precios que terminan en 90, 95 o 99. Este truco es tan viejo que ya nadie debe caer en él, ¿verdad?

Gumroad es una plataforma estadounidense en línea que permite a creadores variopintos vender sus productos sin más intermediarios. En la tabla adjunta, recogida por el psicólogo del consumo Nick Kolenda en su página web, vemos el porcentaje de personas que compraron cierto producto tras ver el mismo anuncio pero con precios distintos: en un caso, *n* dólares; en otro, *n* dólares menos un céntimo. No puede negarse el efecto, que en algunos casos casi dobla las ventas.

Pero ¿por qué percibimos tan distinta la magnitud de un precio acabado en 9 y la de otro tan solo un céntimo más caro? Según los psicólogos del consumo Manoj Thomas y Vicki Morwitz, nuestro cerebro codifica de manera inconsciente el tamaño de un número antes de terminar de leerlo: «Al evaluar 2,99, el proceso de codificación de magnitudes empieza en cuanto nuestros ojos encuentran el número 2. En consecuencia, la magnitud percibida de 2,99 queda anclada al dígito situado más a la izquierda (es decir, 2) y se vuelve significativamente inferior a la magnitud 3,00».

El efecto en realidad debería llamarse del «dígito de la izquierda», pues, como apuntan estos investigadores, afecta a nuestra percepción de magnitud solo si cambia la primera cifra de todas. Así, un céntimo de diferencia entre, por ejemplo, 3,60 y 3,59 carece de importancia.

Pero eso no es todo. ¿Se han fijado en que algunas tiendas enfatizan este efecto disminuyendo el tamaño de los dígitos después del decimal en los carteles de precios? Se trata de un efecto persuasivo basado en la tipografía: el público percibe que un precio que figura en una fuente menor es también más bajo. Por supuesto, todo esto sucede de manera inconsciente, sin nuestro control ni conocimiento.

Las investigaciones muestran también que eliminar los puntos (por ejemplo, escribiendo 3299 € en vez de 3.299 €) crea la ilusión de un producto más barato. De

Precio (dólares)	Porcentaje de compradores	Precio (dólares)	Porcentaje de compradores
0,99	3,06	3,99	3,21
1	1,88	4	2,39
1,99	5,2	4,99	4,67
2	2,39	5	3,84
2,99	3,44	5,99	1,56
3	2,11	6	1,42

TRUCO VIEJO PERO EFECTIVO: Por más que todos lo sepamos, los precios acabados en 99 nos siguen incitando a consumir más. Estos datos, extraídos de la plataforma estadounidense de venta en línea Gumroad, muestran el porcentaje de personas que compraron cierto producto tras ver el mismo anuncio con precios distintos. En algunos casos, rebajar el precio en tan solo un céntimo casi llegó a doblar las ventas.

WWW.NICKKOLENDA.COM/PSYCHOLOGICAL-PRICING-STRATEGIES



PRODUCTOS SEÑUELO: Un truco muy socorrido en restauración consiste en ofrecer un señuelo (el café mediano, en este ejemplo), una versión similar pero peor de un producto (el café grande). Con ello se consigue que nos resulte más atractiva la opción más cara.

modo similar, una fuente con menos interletraje (el espacio que se añade entre las letras) también influye para que el precio se perciba como menor. Incluso la disposición espacial nos condiciona: si un precio se halla a la izquierda o en la parte inferior de un cartel, lo percibiremos como más bajo que si se encuentra a la derecha o en la parte superior.

Productos fluidos

Es probable que todos los efectos anteriores guarden alguna relación con lo que los psicólogos llaman «fluidez». Al cerebro humano no le gusta la complejidad, así que los mensajes simples que podemos procesar de manera fluida y automática nos generan sensaciones positivas. Esto es el abecé de la manipulación: piensen, sin ir más lejos, en el triste espectáculo de la política pública. Cuanto más rápido entendamos algo, más nos gustará de manera inconsciente. Por ejemplo, se ha determinado que, cuando leemos un precio, nuestro cerebro accede de forma no consciente a su versión auditiva. Y puesto que resulta más sencillo procesar precios fonéticamente más cortos, percibimos como más bajas las cantidades con menos sílabas.

Pero los números no aparecen solo en los precios. Muchas marcas usan cifras para nombrar sus productos, como Nikon D40 o D50, o BMW 1, 3 y 5. Tales números ayudan a distinguir el producto, pero también aumentan su atractivo: ¿no le suena mejor KH7 que KH? Pero ¿por qué KH7 y no KH27? Diversos estudios han demostrado que evaluamos de manera más positiva los números que usamos más a menudo. Los procesamos con mayor facilidad y nos resultan más fluidos.

Más aún: en un experimento reciente se pedía a los participantes elegir entre dos marcas de sopa: Campbell y V8. En un grupo de sujetos, V8 se anunciaba como: «Obtén la aportación diaria de vitaminas y minerales esenciales en una botella de V8». En otro, se presentaba como: «Obtén la aportación diaria de 4 vitaminas y 2 minerales esenciales en una botella de V8». Presentada de la segunda manera, acompañada con los números 2 y 4, esta opción fue mucho más elegida. El número 8 es una de esas cifras corrientes de las que hablábamos y, según los investigadores, la sencillez de la conexión con el producto $2 \times 4 = 8$ facilitaba el procesamiento fluido, ya que tenemos totalmente automatizadas las tablas de multiplicar.

Debido a la fluidez, un precio que puede procesarse rápidamente, como los números redondos 10 o 100, nos parecen más justos que 9,73 o 99,68. Ocurre así siempre y cuando nuestra compra sea «emocional». Los segundos, que requieren más recursos mentales, resultan sin embargo más efectivos cuando nuestra compra es «racional».

Adquirir una casa debería ser una compra racional. Pero, como los números pequeños con los que estamos acostumbrados a trabajar nos resultan fluidos, asociamos de forma inconsciente «preciso» con «más barato». Un análisis de 27.000 transacciones inmobiliarias mostraba que los compradores estaban dispuestos a pagar más dinero si el precio parecía más preciso, como 363.785 € frente a 360.000 €, por ejemplo. En un experimento, se pidió a los participantes que estimasen el precio real de un televisor de plasma a partir de un precio de venta sugerido. Cuando estos eran precisos, como 4.998 € o 5.012 €, concluyeron que el precio real debía estar próximo a esas cifras. Sin embargo, frente a un precio redondo, como 5.000 €, se decantaron por pensar que debía valer mucho menos.

Anclas mentales

Conteste en orden a las dos preguntas siguientes: ¿El río Nilo mide más o menos de 300 kilómetros? ¿Qué longitud diría que tiene el río Nilo?

La respuesta a la segunda pregunta varía de manera ostensible si cambiamos los 300 kilómetros de la primera por 15.000. El número 300 ejerce de «ancla» y lo tomamos inconscientemente como número de referencia para nuestra estimación. Así, cuando se usan 300 kilómetros en la primera pregunta, la gente da una estimación media de 450 kilómetros en la segunda. Sin embargo, si se usa 15.000 como ancla, la estimación media asciende a unos 9000 kilómetros.

Fueron los famosos psicólogos cognitivos Amos Tversky y Daniel Kahneman, este último premio nóbel de economía, quienes descubrieron esta forma de condicionamiento, conocida como anclaje. Cuando pidieron a un grupo de participantes que estimaran mentalmente el resultado del producto $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8$, obtuvieron una evaluación media de 512. Sin embargo, cuando solicitaron lo mismo para el producto invertido, $8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1$, la estimación subió a 2250. ¿Por qué, si en ambos casos el resultado es $8! = 40.320$? Tversky y Kahneman sugirieron que los primeros números de la serie influían de manera decisiva al ejercer de ancla en nuestra estimación final.

Desde el descubrimiento de este sesgo cognitivo, su estudio y empleo en publicidad ha sido imparable. En un experimento en el que se vendían discos de música en el puesto de un mercadillo, el vendedor adyacente alternaba cada 30 minutos el precio de una sudadera expuesta de 10 $ a 80 $. Esa cantidad sirvió como ancla: cuando la sudadera se vendía a 80 $, los

compradores pagaban más por los discos, y viceversa. Por tanto, solo hace falta exponer el precio de cualquier cosa para que actúe como ancla.

El anclaje no solo funciona con los precios, sino con cualquier número, como demostraron el economista conductual Dan Ariely y sus colaboradores. En un famoso experimento se mostraba a los sujetos una serie de productos sin precio y con valor medio en el mercado de 70 $. Un participante lanzaba una moneda y, si salía cara, se le preguntaba si compraría el producto al precio en dólares indicado por los dos últimos dígitos de su número de la seguridad social. Cuando salía cruz, se le preguntaba qué cantidad estaría dispuesto a pagar como máximo por ese producto. Los resultados mostraron que, cuanto mayor era la cifra aportada por el número de la seguridad social (un número de dos cifras escogido al azar), mayor era el precio medio que estaban dispuestos a pagar.

El efecto ancla es muy común. Piense, por ejemplo, que los saldos y rebajas se benefician de este fenómeno al mostrarnos un supuesto precio original junto al nuevo valor rebajado. Los vendedores usan también este truco cuando comienzan presentándonos el artículo más caro de todos, aun sabiendo que no lo vamos a comprar. Y, de igual manera, el comerciante de un zoco árabe siempre comenzará a negociar fijando un precio muy elevado.

Señuelos

Veamos con detalle un último truco: el señuelo. Esta estratagema es frecuente en restauración. Suponga que desea un café y que dispone de dos opciones: un vaso pequeño por 2 € o uno grande por 5 €. Usted se debate entre el precio y el tamaño. ¿Qué sucede si añadimos una tercera opción, consistente en un vaso mediano por 4 €?

Acabamos de introducir un señuelo. Puede que usted no quisiera un café tan grande, pero de repente este se ha convertido en una buena opción si lo comparamos con el mediano. De hecho, más personas escogerán el café grande en lugar del pequeño si añadimos el señuelo.

Cuando nos ofrecen diferentes versiones de un producto, las comparamos. Para que nos decantemos por la opción más cara y rentable para el vendedor, se añade una versión similar pero peor de un producto caro: el señuelo. Entonces, como por arte de magia, el mismo producto caro se nos antoja más atractivo.



EFECTO VISUAL: Varios estudios han demostrado que indicar un precio en una fuente de menor tamaño (como el 99 de este ejemplo) induce a percibir el producto como más barato.

En otro famoso estudio, Ariely y su equipo presentaban una oferta de suscripción para la revista *The Economist* con dos opciones: (1) solo web por 59 $, y (2) impresa y web por 125 $. Así planteada, el 68 por ciento de los clientes optaban por la opción (1) y el 32 por ciento lo hacía por la (2).

Luego añadieron un señuelo: solo impresa por 125 $. La situación cambió por completo. Nadie elegía esta última opción, ya que, por el mismo precio, la oferta (2) original ofrecía además la versión web. Pero, bajo estas condiciones, nuevas solo en apariencia, la oferta (2) fue elegida por el 84 por ciento de los clientes, frente al 1 por ciento que se siguió decantando por la (1). La opción solo impresa impulsó al público a comparar las otras dos. Y, como era una oferta similar pero peor que la segunda, el cliente podía reconocer con facilidad el valor de esta última. Como consecuencia, *The Economist* obtuvo un 43 por ciento más de ingresos.

Acabamos de describir una pequeña muestra de las posibilidades manipuladoras solo a través de simples números. Si quieren saber más, busquen términos como «regla del 100» (si se ofrece un descuento en un producto cuyo precio original es menor que 100, es mejor presentar la rebaja en forma de porcentaje; en caso contrario, mejor usar el valor absoluto), «sorpresa y reformulación» (este producto cuesta 300 céntimos —sorpresa—; eso son solo 3 € —reformulación—); «portazo en la cara» (¿me prestas 100 €? ¿Y 10 €?); «recencia y primacía» (sobre el efecto de colocar un mensaje al principio o al final) o «enfoque de pérdidas y ganancias» (basado en las célebres investigaciones de Kahneman sobre la toma de decisiones). En la página web de Kolenda podrá encontrar hasta 42 estrategias de persuasión basadas en números.

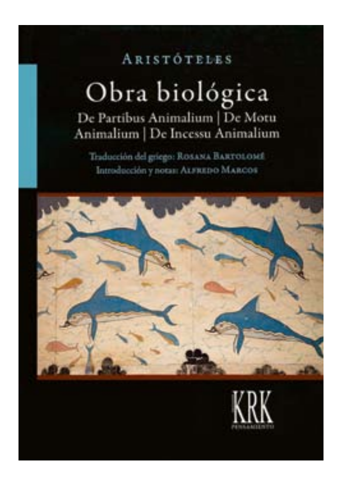
Imaginen qué nivel de refinamiento han alcanzado las técnicas de manipulación y persuasión si lo que han leído aquí se centra solo en meros números. ¿Qué podemos hacer frente a ellas los simples consumidores? Nuestra única esperanza es divulgar estas técnicas para que el ciudadano sea consciente de su uso y actúe en consecuencia. Pero mucho me temo que, si nuestras respuestas son irracionales, inconscientes y automáticas por naturaleza, nunca mejor dicho, «estamos vendidos». IyC

PARA SABER MÁS

Penny wise and pound foolish: The left-digit effect in price cognition. Manoj Thomas y Vicki Morwitz en *Journal of Consumer Research*, vol. 32, págs. 54-64, junio de 2005.
Las trampas del deseo: Cómo controlar los impulsos irracionales que nos llevan al error. Dan Ariely. Ariel, 2008.
Persuasión: 33 técnicas publicitarias de influencia psicológica. Marc Andrews, Matthijs van Leeuwen y Rick van Baaren. Gustavo Gili, 2016.
Página web del psicólogo del consumo Nick Kolenda: **www.nickkolenda.com/psychological-pricing-strategies**

EN NUESTRO ARCHIVO

Psicología de las preferencias. Daniel Kahneman y Amos Tversky en *IyC*, marzo de 1982.
Neuromárketing. Anette Schäfer en *MyC* n.º 10, 2005.
En la mente del consumidor. Mirja Hubert y Peter Kenning en *MyC* n.º 38, 2009.
La huella de la publicidad en el inconsciente. Didier Courbet, Marie-Pierre Fourquet-Courbet y Julien Intartaglia en *MyC* n.º 74, 2015.



ARISTÓTELES: OBRA BIOLÓGICA
DE PARTIBUS ANIMALIUM, DE MOTU ANIMALIUM, DE INCESSU ANIMALIUM
Traducción de Rosana Bartolomé
Introducción y notas de Alfredo Marcos
KRK Ediciones, 2018

Aristóteles, secretario de la naturaleza

Tres obras poco conocidas del estagirita que ponen de relieve su afán por examinar con rigor científico el mundo de los seres vivos

Por los hexámetros de la literatura homérica menudean famosos epítetos. Son estos, digamos, apodos de fantasía, sobrenombres que revelan la característica de un héroe o de un dios. *Los pies ligeros, los níveos brazos, los rosáceos dedos* hablan de Aquiles, de Hera y de Aurora. Pero no es necesario ser héroe o dios para gozar de un apelativo propio. *El oscuro*, *el tábano* o *el perro* se asocian inequívocamente a Heráclito, Sócrates y Diógenes de Sínope, filósofos de la Grecia clásica. Cada uno tiene su historia y su motivo. También los tiene el apelativo con que Platón, *el de espaldas anchas*, se refería a su discípulo Aristóteles. Como el de Estagira leía sin mover los labios, como leía en silencio y aquello provocaba extrañeza, Platón le llamó *el lector*. La fórmula recoge un rasgo genuino de Aristóteles, no hay duda, pero seguramente no el más representativo. Eusebio, obispo de Cesarea, ideó otro mejor mucho tiempo después, antes de que el legado de Aristóteles quedase gravemente mutilado y que de su magisterio solo se conservase su famoso *Organon*. Eusebio le concedió el título de *secretario de la naturaleza*.

Aristóteles dividió el cosmos en dos mitades y de ambas se ocupó con parecido esmero. Por encima de la Luna estaban los astros; por debajo, aquí en nuestro globo, un mundo precario y frágil. Suspendidos en el cielo, engastados desde siempre en sus órbitas circulares, giraban los planetas: el filósofo les reconocía su dignidad divina y los contemplaba en su movimiento imperturbable. La Tierra, asentada en el centro, permanecía rígida e inmóvil, soportando el peso de formas de vida breve. De ellas se ocupó Aristóteles.

Su *Historia animalium* es obra bien conocida. Menos lo son sus *Parva naturalia* y, tal vez menos aún, las tres obras recogidas en esta hermosa edición de KRK: *De partibus animalium*, *De motu animalium y De incessu animalium*. La profesora Rosana Bartolomé, de la Universidad de Valladolid, es la encargada de la traducción desde el griego. La introducción y las notas críticas corren a cargo del catedrático Alfredo Marcos, de la misma universidad, a quien la pasión por la biología aristotélica le viene de muy lejos.

El fresco minoico de los delfines adorna la cubierta de la obra. La elección resulta afortunada. No en vano, el azul del mar es el color que baña con frecuencia las observaciones del estagirita, y el estudio aristotélico de los delfines revela quizás mejor que ningún otro las destrezas que elevaron su obra zoológica a una altura que ni Plinio primero ni Eliano después lograron superar. En estos hay un tono crédulo y moralizante. Y su obra, aunque interesante por muchos conceptos, parece más una sucesión de apólogos que un estudio serio de los animales. Además, la observación directa cuenta en ella bien poco. Sin duda, la comprensión del reino de la vida les importa menos que su condición de receptáculo literario, de pretexto narrativo.

En Aristóteles el tono es muy distinto. El relato preocupa secundariamente y el objeto es siempre lo que prevalece, la sustancia particular, aquello que concentra su interés. E importa el animal en el ejercicio de la vida, como realidad que existe en virtud de su fin propio. Ahí reside su belleza. Si el animal reclama atención es porque está vivo. Una vez muerto, privado de su organización funcional, ya solo es animal por homonimia, como los delfines de Knossos solo lo son por su parecido con los delfines que rasgan hoy el agua del Egeo y respiran aire por su espiráculo.

En *El testamento de Aristóteles* (Edilesa, 2000), Marcos imaginó al filósofo recorriendo el litoral occidental de Eubea a bordo de un velero de dos palos. Se dirigía hacia Calcis, lugar de su exilio definitivo. El capitán que lo llevaba hablaba de criaturas marinas, de las que algunas eras reales y otras simplemente imaginarias. Aristóteles tomaba buena nota de todo. Las bestias portentosas y heteróclitas (aunque irreales) engrosarían su inventario de monstruos y leyendas; en cuanto al resto, enriquecería el océano de sus obras de historia natural, trabajo nunca concluido y que no dejaba de crecer bajo su cálamo. Es muy probable, en efecto, que las anotaciones de la biología aristotélica se fueran aglutinando por capas, que los testimonios de terceros y sus propias observaciones sufrieran reajustes, adiciones y exclusiones. Había que armonizar los datos, levantar acta de los animales que poblaban el mundo y descorrer por fin el velo de la naturaleza en busca de sus secretos.

Es posible que Aristóteles albergara el deseo de ofrecer un estudio de los animales a escala universal. Es posible que Alejandro, queriendo complacer a su maestro, le hiciera llegar algunas bestias capturadas en sus incursiones por Oriente. Podemos fantasear con la idea de que fuera así. Podemos suponer que el círculo de sus observaciones estuviera destinado a crecer en forma de espiral, con su centro situado en Grecia y su curva abriéndose hasta cubrir un territorio de una vastedad extraordinaria. De hecho, su obra zoológica contiene materiales exóticos, y, aunque el número de estos es escaso, parece suficiente para comprender que el horizonte de sus investigaciones pudo situarse alguna vez lejos de los límites de la Hélade.

Con todo, su obra tiene una coloración específicamente griega. Así, por ejemplo, del centenar largo de especies entrelazadas en el relato de su *De partibus animalium*, la inmensa mayoría son autóctonas. Eran animales que Aristóteles contemplaría en sus correrías tierra adentro o en sus navegaciones por el mar Egeo. Podía, según el caso, correr tras ellos, burlar su vigilancia y estudiarlos en sus espantadas; dejar las sandalias en la orilla, mover el agua y atraparlos con sus propias manos; subir de rama en rama o tenderse boca abajo para seguir la traza de un insecto.

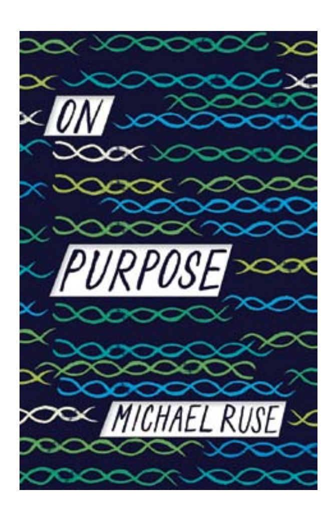
Aristóteles no se limitó a describir. Quiso también explicar lo que veía, ambición que debió de obligarle a ceñirse a una geografía de lugares vecinos, allí donde pudiera alargar las jornadas y observar sin más prisa que la que quisiera darse. Y los resultados de sus investigaciones, pese a ello, cobraron un alcance universal. Comprendió muy pronto el inconveniente de las taxonomías, detectó la presencia de animales ambiguos, y adivinó en la naturaleza la existencia de un principio de continuidad que venía a difuminar los espacios entre las especies y los límites entre los tres reinos [*véase* «Aristóteles», por Luis Alonso; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

En sus explicaciones empleó todo un arsenal de inteligentes comparaciones, basadas a menudo en el aspecto funcional de los órganos: la nariz de los elefantes es como el instrumento empleado por los buzos en sus inmersiones; las venas le parecen anclas; el cuello de las aves zancudas es una caña, y el pico es sedal y anzuelo; las aletas de los peces guardan parecido con los remos de las naves, y la cola de las aves que vuelan, con el timón de cualquier barco. Esas comparaciones iluminan el texto y resultan de una utilidad indudable.

No siempre, sin embargo, se avanza sin dificultad. Muchos son los pasajes en que Aristóteles adopta un estilo sincopado, abrupto. Cuando tal cosa sucede, entonces podrá el lector conjurar el desánimo acudiendo al aparato crítico, donde Marcos resuelve dudas y ofrece utilísimas indicaciones.

Aristóteles encontraba placer en el estudio de las formas vivas. Que el lector lo encuentre también en la lectura de este libro.

—Fernando Calderón Quindós
Departamento de Filosofía
Universidad de Valladolid



ON PURPOSE
Michael Ruse
Princeton University Press, 2018

Ciencia y teleología

Historia del concepto de finalidad en el pensamiento occidental

Uno de los objetivos del empirismo lógico fue desterrar del campo de la metaciencia la causa final. Filósofos y científicos han seguido empeñados en esa labor, particularmente correosa en el dominio de la biología. A veces con planteamientos más o menos ingeniosos, como el de Jacques Monod y su teleonomía, inexplicablemente ausente en este libro de Michael Ruse dedicado a la idea de finalidad en el pensamiento filosófico, religioso, científico e histórico desde la Grecia clásica hasta la actualidad.

El lenguaje de la evolución, de la adaptación al medio, induce a menudo a dar por cierta una finalidad no demostrada. Valgámonos de un ejemplo caro a Ruse: las placas óseas del *Stegosaurus*, una bestia del Jurásico tardío. El animal fue descubierto a finales de los años setenta del siglo xix en el estado de Wyoming y, desde entonces, han corrido ríos de tinta para explicar la existencia de tales placas. El recurso habitual, que sirvieran para la defensa o la lucha, no podía ser cierto, pues la conexión entre las placas y el cuerpo era demasiado frágil para que funcionaran de manera efectiva en una batalla. Para otros habrían desempeñado un papel en el cortejo de apareamiento; sin embargo, también las hembras tenían placas. Pudiera ser que su propósito se relacionara con el control de la temperatura: radiar calor cuando el animal estaba demasiado caliente y absorberlo cuando estaba frío. Otros sostienen que podrían haber constituido la vía para que los individuos se reconocieran entre sí como miembros de la misma especie.

¿Cuál era la finalidad de las placas? ¿Se adquirieron en el curso evolutivo para la lucha? ¿Para atraer a su pareja? ¿Para controlar la temperatura? ¿Para identificarse ante sus congéneres? Este tipo de lenguaje es teleológico; *telos*, en griego, significa «fin» [*véase* «Naturaleza y finalidad», por Héctor Velázquez Fernández; Investigación y Ciencia, mayo de 2015].

A tres se reducen las ideas principales sobre finalidad que han permanecido en el pensamiento occidental a lo largo de más de 2000 años. En la perspectiva platónica, el propósito resulta de la planificación de un ser humano o divino. Para Aristóteles, el propósito surge de una tendencia o principio de orden en el mundo natural. Para Kant, el propósito es esencialmente heurístico, algo por descubrir. Con esos tres conceptos hemos de comparar la teoría darwinista de la selección natural, una idea hecha sustancia.

Algunos se apoyan en ese lenguaje teleológico para sostener que la biología no es ciencia en el sentido riguroso de la palabra, sino una colección de observaciones y hechos. El entrelazamiento de la biología con la teleología se retrotrae al mundo griego clásico. Existen dos fuentes principales para el pensamiento de Platón sobre el propósito. La primera es el *Fedón*, el diálogo sobre el último día de Sócrates; allí hace explícita la necesidad del concepto de orden para conferir sentido a nuestro modo de entender las cosas y la finalidad que les es connatural. Mientras aguarda su destino, se pregunta si puede ser explicado mecánicamente, ya que su propio cuerpo está hecho «de huesos y músculos; y los huesos son duros y tienen articulaciones que los dividen, y los músculos son elásticos y cubren los huesos». Todo ello, afirma Sócrates, no es la verdadera causa de encontrarse donde se encuentra. La razón es que los atenienses han decidido condenarle. «Y yo he pensado que lo mejor y más recto es permanecer aquí y recibir la sentencia», continúa. Sócrates describe la situación como una confusión de causas y condiciones: él está con sus huesos y músculos, pero esa no es la explicación real de por qué está allí.

La otra fuente es el *Timeo*, cuya tesis central es que el mundo estaba esencial-

mente desorganizado hasta que una mente diseñadora, el Demiurgo, puso orden en él. El Demiurgo es externo al mundo, un ser que impone su voluntad a un universo preexistente, sin principio ni fin. La investigación sobre la finalidad de huesos y músculos no es solo una pesquisa sobre la constitución del ser humano, sino también, en última instancia, sobre los planes del Demiurgo.

Aristóteles se mostró vivamente interesado en las causas finales. Sostenía que todos los seres vivos contaban con fuerzas que los encaminaban hacia su propio fin. Esas fuerzas de la vida operan aquí y ahora, y, en cierto modo, tienen el futuro en mente. Así, animan la bellota para que pueda convertirse en encina. Lo mismo que Platón, Aristóteles acudía al lenguaje metafórico para indicar el diseño, mas, a diferencia de su maestro, repudiaba la supervisión de una inteligencia consciente. Aristóteles distinguía cuatro causas: material, formal, eficiente y final. En una estatua, el escultor es la causa eficiente; la causa material es el mármol, barro o madera de que consta la estatua; la causa formal es la configuración real de estatua; la causa final sería el motivo de la construcción de la escultura.

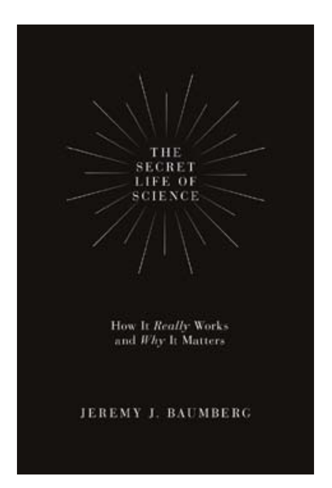
Esa visión del saber saltó por los aires durante la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII. Para Platón y Aristóteles, la cuestión de las causas finales se había aplicado a los fenómenos físicos (las estrellas, por ejemplo) tanto como a los biológicos. Ambos pensaban que los objetos eran más o menos como organismos. ¿Por qué caían los graves? Porque al estar constituidos por el elemento tierra (los otros tres componentes fundamentales eran el agua, el fuego y el aire) buscan su lugar natural; a saber, el centro de la Tierra.

Después cambiaron las metáforas de la naturaleza. Los científicos no pensarían ya en términos de organismos, sino de máquinas. El mundo semeja un reloj gigante. Y el cuerpo humano, escribía Descartes, recuerda a una máquina compleja, donde el corazón se comporta como una bomba hidráulica y las extremidades remedan palancas y poleas. Robert Boyle se percató de que, en cuanto se comienza a pensar en términos mecánicos, resulta estéril hablar de fines y propósitos.

También Kant puso su absoluta confianza en la mecánica de Newton para entender el mundo. En su *Crítica del juicio* se ocupó de la biología, una disciplina que nos obliga a pensar en términos de función, de causas finales. Los seres vivos no están determinados por las leyes de la naturaleza en la misma forma en que lo están los seres inertes; necesitamos un lenguaje finalista para explicar el mundo orgánico. Aunque no todo lo que afecta a los organismos exige un análisis teleológico: la hierba no crece «para» alimentar al ganado, aunque de ello salga este beneficiado. Los seres vivos presentan una organización que les conduce a la supervivencia y la reproducción. En cierto modo, las partes de los organismos son a un tiempo causa y efecto. ¿Podemos vivir sin la idea de finalidad, de propósito? ¿Deberíamos siquiera intentarlo? Kant pensaba que estábamos anclados a un propósito.

En *El origen de las especies*, Darwin hundió la cuestión de las causas finales individuales al explicar por qué los organismos se hallan tan bien adaptados al medio. El lenguaje teleológico era apropiado porque órganos como los ojos y las manos, aunque no estaban diseñados, parecía como si lo estuvieran. Mas, en puridad, no había ninguna causa final, sino una lucha por la existencia entre los organismos o, con mayor precisión, una lucha por la reproducción.

—Luis Alonso



THE SECRET LIFE OF SCIENCE
HOW IT REALLY WORK AND WHY IT MATTERS
Jeremy Baumberg
Princeton University Press, 2018

El ecosistema de la ciencia

Una visión personal de la actividad científica

The secret life of science aborda un tema que ha fascinado a los teóricos desde que, en 1973, Robert Merton formulara en *The sociology of science* la teoría acerca de cómo la organización social de la ciencia facilita o dificulta sus objetivos fundamentales de certificación y difusión del conocimiento. Para analizar esa organización social, Jeremy Baumberg recurre a la idea de ecosistema, describiendo el mundo de la ciencia como un sistema ecológico en constante evolución. La idea clave que rige dicha analogía es la competición: al igual que en el mundo natural, la ciencia se caracteriza por la escasez de recursos y la lucha por ellos. En este entorno competitivo, solo sobreviven (obtienen fondos) los mejor dotados.

Sin embargo, necesitamos dos rasgos más de la biología evolutiva para que la analogía funcione: la variación ciega o azarosa y la transmisión hereditaria. No tenemos mutaciones azarosas, y el propio Baumberg reconoce que la idea más cercana a la herencia genética es que los jóvenes científicos son formados en el mismo molde institucional. Por tanto, aunque el autor se esfuerza en mantener la analogía a lo largo de toda la obra, debemos entenderla más bien como una metáfora. El ecosistema de la ciencia nos habla por tanto de la interacción entre distintos grupos de individuos, con objetivos diferentes y en ocasiones fines comunes, que medran en un entorno de recursos escasos. La relación planteada no nos permite afirmar que el ecosistema científico tienda a algún tipo de equilibrio, el cual determinaría, a través de sus interacciones, el tamaño sostenible del propio sistema y permitiría establecer alguna conclusión acerca de su funcionamiento.

Bajo esta metáfora, el autor analiza el sistema de publicaciones, el mundo de los congresos científicos, la financiación de la ciencia, su divulgación y el desarrollo de una carrera académica típica. Aunque la cuestión ya fue profusamente analizada

por Derek Solla Price en *Little science, big science and beyond* en los años setenta del siglo pasado, la idea que impulsa esta obra es el crecimiento exponencial de la ciencia, que, según el autor, podría estar expandiéndose demasiado.

El sistema de publicaciones ha suscitado el interés de los teóricos probablemente desde el nacimiento de la primera revista científica, hacia el año 1650. En esos momentos, su finalidad era «la comunicación de todo cuanto se descubra», según rezaba el primer editorial de *Philosophical Transactions*. Con el tiempo, esa función se amplió al modo en que se certificaba el conocimiento y se constituyó como sistema de recompensas de la ciencia, para llegar a nuestros días como el método a través del cual se evalúa la calidad científica de la producción de un investigador y, por extensión, del investigador mismo [*véase* «El catálogo que creó la cienciometría y transformó la ciencia», por Alex Csiszar; Investigación y Ciencia, abril de 2018].

El crecimiento de la ciencia no se refiere solo al número de investigadores, sino también a la cantidad de revistas y de artículos que se publican. Según el autor, en la actualidad se editan 25.000 revistas en las que aparecen un millón de artículos al año. Baumberg nos ofrece una visión de una pequeña parte de ese entramado aplicando los análisis de Solla Price a las revistas *Nature* y *Science*, así como a la base de datos ISI Web of Science. Así, vemos la probabilidad de que un artículo sea citado, cómo se relacionan unos artículos con otros a través de la red de la ciencia, o cómo algunos artículos adquieren una ventaja acumulativa.

El aumento del número de científicos ha conllevado no solo un incremento en la cantidad de revistas, sino también la organización de un mayor número de congresos. Mientras que estos son esenciales al ecosistema como un todo para difundir la información, resultan, según el autor, profundamente ineficientes en relación con los fondos empleados para asistir a ellos.

El tercer gran sistema analizado es el de la financiación de la ciencia. En este subsistema la competencia incide en la pérdida de diversidad, al concentrar la financiación en instituciones y grupos de élite [*véase* «Replantear la financiación», por John P. A. Ioannidis, *en este mismo*

número]. El análisis del sistema de publicaciones y de financiación pone sobre la mesa el uso de indicadores, derivados del sistema, para la obtención tanto de fondos como de un puesto permanente en algún organismo investigador.

En las páginas finales, el autor pide la creación de más indicadores, nuevas métricas que valoren el liderazgo, la colaboración, la comunicación o el rigor. Pero tal vez no necesitemos más métricas, sino menos. Tal vez lo que necesitamos es que los evaluadores juzguen realmente los trabajos más allá de la revista en la que se publican, tal y como ha señalado una reciente sentencia del Tribunal Supremo español, que dicta que los trabajos han de evaluarse por su contenido, y no por la revista en que aparecen [*véase* «La tiranía del factor de impacto», por Reinhard Werner; Investigación y Ciencia, marzo de 2015]. Mientras tanto, nuestros sistemas de educación superior siguen alimentando el ecosistema con nuevos graduados que van a la industria o deciden emprender la ardua y difícil carrera científica. El último de los subsistemas que aborda Baumberg es el de los medios de comunicación, aunque se limita al papel de los comunicados de prensa por parte de las grandes revistas científicas y a cómo estos son usados para difundir la ciencia.

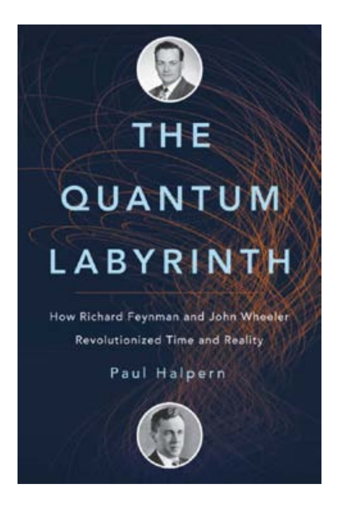
En todo este análisis se echa en falta el entorno que rodea al ecosistema de la ciencia. No hay una sola palabra sobre cómo la ciencia se relaciona con la sociedad, salvo en nuestro papel de contribuyentes financiadores indirectos de la ciencia. La curiosidad del científico y la utilidad que emerge de esa curiosidad es la que produce, según el autor, nueva tecnología que permite, a su vez, hacer más ciencia en algún tipo de círculo virtuoso. Este modelo lineal, que olvida el papel de la sociedad en la ciencia, no se encuentra en la literatura desde que Vannevar Bush lo preconizara en 1945 en *Science: The endless frontier*.

El énfasis en la competitividad hace que se olvide de que en cualquier ecosistema se dan relaciones competitivas y simbióticas, de cooperación y altruismo. La imagen del ecosistema transmite la idea de un conjunto de individuos luchando encarnizadamente por los recursos financieros. Pero olvida que los individuos encarnan otros valores que pueden guiar su actividad, como la honestidad, la preocupación por el bien público o el deseo de mejorar la vida humana. Estos valores conviven con el deseo de reconocimiento, el deseo de poder y algunos egos desmedidos, pero no pueden dejarse de lado en un análisis de la actividad científica.

Es cierto que el libro refleja una visión personal del autor. Una visión de alguien que ejerce la ciencia desde el mundo académico, aunque también posee credenciales de la industria. Pero, aunque el enfoque sea personal, como académica me resulta extraño leer un libro que pretende analizar el sistema científico y que no incluye ni una sola referencia bibliográfica. Es cierto que la obra debe leerse consultando la página web, donde se nos presenta una amalgama de datos e informes de distintas fuentes. Pero esos datos no se encuentran directamente relacionados con las afirmaciones del autor, así que es tarea del lector decidir cuáles de ellos sustentan qué afirmaciones.

Gran parte de las ideas que se presentan en el libro han sido tratadas por sociólogos, politólogos de la ciencia y filósofos a lo largo de los últimos cincuenta años. El autor pide, en las páginas finales, más datos para una mejor ciencia de la ciencia. Pero nunca los datos por sí solos constituyeron una buena teoría, y nunca una buena teoría se construyó sin reconocer las deudas con el pasado.

—Obdulia Torres González
Departamento de Filosofía,
Lógica y Estética
Universidad de Salamanca



THE QUANTUM LABYRINTH
HOW RICHARD FEYNMAN AND JOHN WHEELER REVOLUTIONIZED TIME AND REALITY
Paul Halpern
Basic Books, 2017

La obsesión por entender el universo

Un atractivo recorrido por la obra, personalidad y legado de Richard Feynman y John Wheeler

Hay una escena que resume la personalidad de John Wheeler, uno de los dos protagonistas de este excelente libro. En ella, Richard Feynman (el otro protagonista, estudiante de doctorado de Wheeler en la Universidad de Princeton y premio nóbel de física en 1965 por su contribución a la electrodinámica cuántica) le explica a Kip Thorne (también estudiante de Wheeler y premio nóbel en 2017 por sus aportaciones a la detección de ondas gravitacionales) que hay una cosa que conviene tener en cuenta cuando se trabaja con Wheeler: «Parece que está loco. Y lo que la gente de tu generación no sabe es que siempre ha sido así. Sin embargo, cuando yo era estudiante, descubrí que, si tomas una de esas ideas locas y la despojas de las capas de locura una tras otra, como si fueran las capas de una cebolla, muchas veces encontrarás que en el corazón de esa idea hay un poderoso núcleo de verdad». La advertencia de Feynman no solo refleja la habilidad de Wheeler para dar con ideas clave —aunque de apariencia extravagante—, sino también la capacidad de Feynman para ir «quitando capas».

El libro de Halpern brinda un apasionante paseo por la historia de la física entre 1940 y 1990 de la mano de estos dos protagonistas. En él no solo se describe la colaboración entre Feynman y Wheeler, y sus contribuciones esenciales a la física moderna (Feynman a la electrodinámica cuántica y Wheeler a la relatividad general), sino también sus errores y muchas otras aportaciones que han dado lugar a nuevas ramas de la física, desde la teoría cuántica de campos a los ordenadores cuánticos y la información cuántica. Además, en la obra de Halpern también

se narra el empeño de ambos, pero sobre todo de Wheeler, por entender lo que el autor llama el «laberinto cuántico»; es decir, «de dónde viene la teoría cuántica» [*véase* «El puzle de la teoría cuántica», por Adán Cabello; Investigación y Ciencia, septiembre de 2017].

El libro adolece de dos pequeñas pegas. Por un lado, hay un desequilibrio entre la vívida descripción que hace Halpern de la vida y las múltiples facetas de la personalidad de Feynman, y la narración, mucho más plana y falta de detalles, de la vida, obra, legado y personalidad de Wheeler. Por otro, la obra aporta poco con respecto a fuentes bien conocidas. En particular, hay pocas cosas aquí que no estén ya en *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?* y *¿Qué te importa lo que piensen los demás?*, los dos libros de anécdotas de Feynman; *The beat of a different drum*, la biografía de Feynman escrita por Jagdish Mehra; *Geons, black holes, and quantum foam*, la autobiografía de Wheeler escrita junto con Kenneth Ford, otro de sus estudiantes de doctorado; o la larga entrevista que hizo Ford a Wheeler en 1996 y que puede encontrarse en www.webofstories.com.

La historia empieza en 1939, cuando Feynman, un brillante graduado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se presenta en la oficina de Wheeler en la Universidad de Princeton para empezar a trabajar como profesor asistente. Wheeler es un hombre de familia, conservador, que habla pausadamente y que es siete años mayor que Feynman. Pero también es un inconformista lleno de ideas, que sueña con reconciliar a Einstein (su colega y vecino en Princeton) y a Bohr (su mentor en Copenhague) encontrando la explicación definitiva de la teoría cuántica. Feynman es un estudiante prodigio, pero también un consumado *showman* que disfruta siendo el centro de atención. Los dos quieren comprender el universo. Pero no solo tienen personalidades diferentes, sino también perspectivas e intereses distintos.

Mientras Feynman, como la mayoría de los físicos estadounidenses de la época, evita las cuestiones filosóficas, Wheeler, hijo mayor de dos bibliotecarios, las adora. Al igual que adora a Bohr, con quien comparte no solo el gusto por las cuestiones filosóficas, sino su capacidad para crear escuela. Con todo, Wheeler también se da cuenta de que hay que ir mucho más allá de Bohr y descubrir el origen de la teoría cuántica.

A Feynman las cuestiones filosóficas le traen sin cuidado. Sin embargo, reconoce —y no le importa manifestarlo en público— que «nadie entiende la mecánica cuántica». Pero, mientras que para Wheeler entender de dónde viene la teoría es una obsesión, Feynman recomienda a los estudiantes que no piensen en ello, porque se trata de «un callejón del que nadie ha logrado salir». Según Feynman, lo que hay que hacer es ir quitando capas a la cebolla e ir descubriendo leyes que puedan verificarse experimentalmente.

Los dos se profesan mutua admiración y son conscientes de su complementariedad. Feynman empieza trabajando bajo la supervisión de Wheeler en el problema de los infinitos en la electrodinámica cuántica de Paul Dirac. ¿Interacciona el electrón consigo mismo? La respuesta estándar es que sí: al electrón debería afectarle su propio campo electromagnético. No obstante, al calcular esa autointeracción, el resultado es infinito. Al principio, Wheeler y Feynman siguen un camino exótico —e incorrecto— que resucita la acción a distancia newtoniana y la combina con soluciones de las ecuaciones de Maxwell que proceden hacia delante y hacia atrás en el tiempo.

La implicación de EE.UU. en la Segunda Guerra Mundial los separa. Ambos trabajan en el Proyecto Manhattan para fabricar bombas atómicas, pero Wheeler lo hace en Chicago y Feynman en Los Álamos, donde, además, ha de lidiar con la trágica muerte de Arline Greenbaum, su primera esposa.

Tras la guerra, Feynman termina de desarrollar sus técnicas de cálculo, las integrales de camino, las cuales permiten cancelar los infinitos sin renunciar a que el electrón interaccione consigo mismo. Este es el trabajo por el que años más tarde recibiría el premio Nobel. Charles Misner, otro de los estudiantes de Wheeler, sintetizaría así la contribución del método de Feynman: «La realidad funciona tomando conciencia de todas las posibilidades antes de convertirse en realidad».

Por su parte, Wheeler rescata la relatividad general de Albert Einstein para atacar con éxito multitud de problemas astronómicos y cosmológicos. Y no deja de producir ideas exóticas. En los años setenta, abandona progresivamente la idea de que todo son campos y empieza a defender que el universo es un sistema que se autosintetiza, no «una máquina gobernada por una ecuación mágica». Es un universo participativo, en el que todo es consecuencia de una infinidad de actos de observación y en el que las leyes físicas emergen de la ausencia de leyes. Un universo en el que todo es información y en el que, citando a Machado, «no hay camino, se hace camino al andar» (cita incluida en el libro *Gravitation*, escrito en 1973 por Wheeler, Misner y Thorne).

Hay dos cosas que hacen muy interesante el libro de Halpern. Por un lado, el contraste que ofrece entre las personalidades tan distintas de dos investigadores a quienes les une su obsesión por descubrir cómo funciona el universo. Ese contraste añade una perspectiva nueva a historias ya conocidas y, curiosamente, ayuda a entender los movimientos vitales y científicos de ambos personajes.

Pero, sobre todo, hay otro aspecto que convierte a *The quantum labyrinth* en una obra especialmente atractiva: la historia ha demostrado que Feynman y Wheeler tenían una rara capacidad para intuir por qué caminos debía ir la física. En una charla de 1959, Feynman anticipa la nanotecnología y los ordenadores y simuladores cuánticos. Y Wheeler es, sin duda, el padre de la física cosmológica, de los agujeros negros (Jacob Bekenstein era otro estudiante de Wheeler), de las ondas gravitacionales (Thorne) y de la recién inaugurada astronomía de multimensajeros [*véase* «Mensajeros celestes», por Ann Finkbeiner; Investigación y Ciencia, julio de 2018]. También es el padre en la sombra de la teoría cuántica de la información (Carlton Caves, Bill Wootters, Wojciech Zurek fueron también discípulos de Wheeler), heredera directa de la visión del universo de Wheeler en el que todo es información. Y también es el instigador, en algún caso a su pesar, de muchas de las interpretaciones modernas de la teoría cuántica, como la de los «muchos mundos» (Hugh Everett y Bryce DeWitt fueron estudiantes de Wheeler) o el bayesianismo cuántico (*Qbism*, en inglés), de Chris Fuchs (otro estudiante de Wheeler), que reivindica el universo participativo de Wheeler para entender la teoría cuántica [*véase* «Bayesianismo cuántico», por Hans Christian von Baeyer; Investigación y Ciencia, agosto de 2013]. Sería estupendo poder saltar cincuenta años hacia el futuro y ver hasta dónde nos han llevado todas las intuiciones de Wheeler y su escuela.

—Adán Cabello
Departamento de Física Aplicada II
Universidad de Sevilla

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

DICIEMBRE

1968

Células polivalentes

«La mejor prueba sobre la retención de genes en células completamente diferenciadas procede de los experimentos realizados en la Universidad de Oxford con óvulos de la rana *Xenopus*. Los primeros experimentos con núcleos de células intestinales se pensaron para mostrar que al menos varios de esos núcleos poseen todos los genes necesarios para la diferenciación de todos los tipos de células y que, por tanto, algunos de los embriones trasplantados procedentes de núcleos intestinales podrían criarse hasta el estado de rana adulta normal. De hecho, a partir de núcleos intestinales trasplantados se han obtenido ranas adultas, tanto machos como hembras, que son fértiles y normales en todos los aspectos. Ese resultado demuestra que al menos algunas células intestinales poseen tantos tipos de genes nucleares como los contenidos en un óvulo fecundado.» —J. B. Gurdon.

Por este trabajo John B. Gurdon compartió el premio Nobel de medicina de 2012.

1918

Buenas hormigas

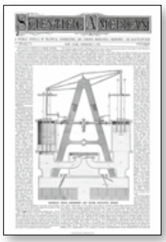
«En *Sudan Notes and Records* se publica un alegato a favor de la hormiga blanca, o termita, la cual ha adquirido una muy mala reputación entre los europeos. El clima sudanés se caracteriza por el rápido crecimiento de la vegetación, favorecido por las lluvias estacionales, seguido de sequía y desecación. La termita ataca a las plantas solo cuando estas se debilitan por la sequía o la enfermedad, en cuyo caso, cuanto antes sean destruidas, tanto mejor. De no ser por la termita, en pocos años todas las zonas fértiles del Sudán estarían cubiertas de una impenetrable capa de vegetación muerta; y el único método de limpiarla sería el concurso del fuego, cuyos peligros son bien conocidos.»



1968



1918



1868

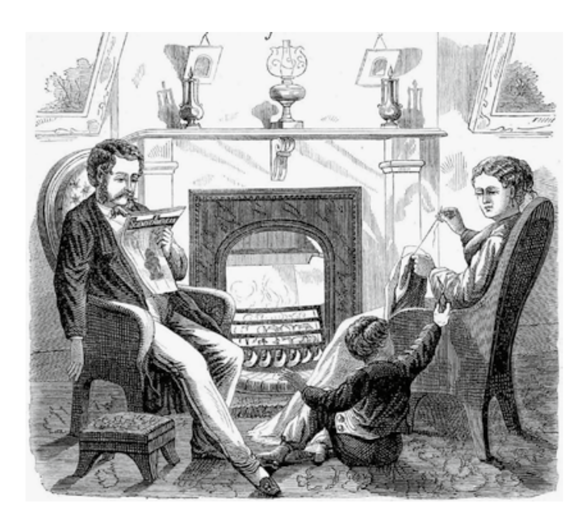
Las complicaciones de la desmovilización

«Estados Unidos sacó a cuatro millones de hombres de la industria y los vistió de caqui. Dos millones de ellos están regresando lentamente desde suelo extranjero para ser reabsorbidos en el cuerpo político. Los otros dos millones serán desmovilizados a la mayor rapidez posible. Si fuera factible devolver de golpe al país dos millones de hombres, cada uno con una paga de treinta dólares y un billete de regreso a casa en sus manos, resultaría casi seguro un caos. No habría trenes suficientes para transportarlos, podría no haber techos disponibles suficientes para guarecerlos, e incluso podría no haber comida suficiente para alimentarlos. Desde luego, si bien hay dos millones de puestos de trabajo vacantes a la espera de dos millones de hombres sin trabajo, el encuentro entre ambos podría no darse de la noche a la mañana.»

1868

Chimeneas al día

«Todos los amantes del confort doméstico disfrutan con el fulgor de un hogar abierto, pese a la mayor capacidad de caldeo de los calefactores y las estufas cerradas. Y muchos prefieren las inevitables pérdidas y el gasto adicional de la parrilla, con su grato toque hogareño, a esos artefactos más económicos y menos saludables. Si pudiera conseguirse que el hogar abierto diese el mismo calor que la estufa, sin un coste mayor, sería preferido por todos. Ampliar el confort es el propósito de la mejora del hogar abierto que se muestra en el grabado.»



1868: Una chimenea hogareña más eficiente —quizá.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIX, N.º 23; 2 DE DICIEMBRE DE 1868

Vuelo mortal

«Cuando el encargado de Minot's Light se había retirado en la noche del miércoles, se oyó un gran estruendo que retumbó en todo el edificio. Supuso el farero que su ayudante habría roto por accidente algún recipiente de gas. Pero aquel, con semblante alarmado, le informó al punto de que el espejo, de más de seis centímetros de grueso, situado a un costado de la gran linterna que remata el faro, había saltado a trozos, quizá por impacto de un disparo de rifle. De inmediato se procedió a inspeccionar el lugar, pero el descubrimiento en la cornisa del faro de un mergánsar muerto, con casi todos los huesos del cuerpo rotos, explicó lo que de otro modo habría quedado como misterio sin resolver. El ave fue cocinada, degustada y declarada exquisita por el farero y su familia.»

Tráfico y peatones

«En todas nuestras superpobladas ciudades, como Nueva York, los peatones están obligados a cruzar calles para desplazarse entre las manzanas, con peligro de la vida y el total deterioro de trajes y calzados. Nueve de cada diez accidentes por choque ocurren en los cruces. Esta ciudad emplea numerosos policías para ayudar a las personas a vadear ríos de porquería e impedir que sean arrolladas por conductores temerarios. Los cruces deberían dotarse de túneles. Se necesitan puentes que sean lo bastante altos para admitir vehículos cargados y ómnibus. En cambio, los túneles de cruce no hace falta que sean profundos, y pueden estar iluminados con gas noche y día, a un coste que sería la cuarta parte del de mantener policías vigilando los cruces principales.»

COSMOLOGÍA

Las primeras galaxias del universo

Dan Coe

Un nuevo proyecto ha conseguido adentrarse en uno de los períodos más desconocidos de la historia cósmica.



QUÍMICA

El nacimiento de la attoquímica

Fernando Martín García

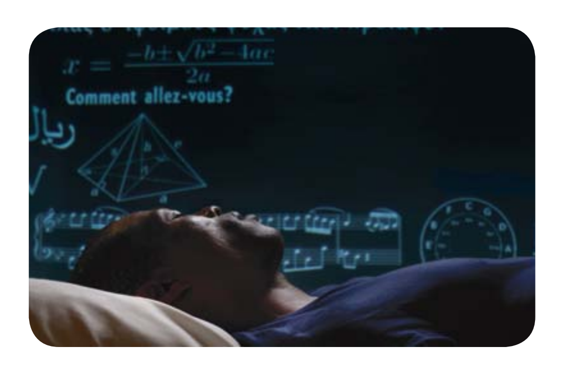
El empleo de láseres de attosegundos permite un mayor control de las reacciones químicas y con ello abre las puertas a la obtención de nuevas moléculas y materiales.

NEUROCIENCIA

El despertar de la hipnopedia

Ken A. Paller y Delphine Oudiette

Las técnicas experimentales demuestran que se puede fortalecer la memoria cuando el cerebro está apagado.





INFORME ESPECIAL:
LA CIENCIA DE LA DESIGUALDAD

Una economía manipulada

Joseph E. Stiglitz

¿Cómo afecta la brecha económica a la salud?

Robert M. Sapolsky

Algoritmos para paliar la pobreza

Virginia Eubanks

El coste ambiental de la desigualdad

James K. Boyce

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes*, *El problema sin solución y Senderos de luz en el agua*; Lorenzo Gallego: *La llegada de nuestros ancestros a Asia*; Bartolo Luque: *La ciencia de redes cumple 20 años y Cien años del teorema de Noether*; José Óscar Hernández Sendín: *Clics, mentiras y cintas de vídeo*; Fabio Teixidó: *Informe especial: Estado de la ciencia global 2018*; Xavier Roqué: *Unión y desunión*; Ana Mozo: *Rabia en el cerebro*; Luis Cardona: *Extinciones causadas por la pesca*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España